ISSN 2307-5732

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

6.2017

ВІСНИК

Хмельницького національного університету

Технічні науки
Technical sciences

SCIENTIFIC JOURNAL

HERALD OF KHMELNYTSKYI NATIONAL UNIVERSITY

2017, Issue 6, Volume 255

Хмельницький

ВІСНИК
ХМЕЛЬНИЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
серія: Технічні науки

Затверджений як фахове видання (перереєстрація)
Наказ МОН 04.07.2014 №793

Засновано в липні 1997 р. ***Виходить 6 разів на рік***

Хмельницький, 2017, № 6 (255)

Засновник і видавець: Хмельницький національний університет
(до 2005 р. – Технологічний університет Поділля, м. Хмельницький)

Включено до наукометричних баз:

Google Scholar	http://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=aIUP9OYAAAAJ
Index Copernicus	http://jml2012.indexcopernicus.com/passport.php?id=4538&id_lang=3
РИНЦ	http://elibrary.ru/title_about.asp?id=37650
Polish Scholarly Bibliography	https://pbn.nauka.gov.pl/journals/46221

Головний редактор	**Скиба М. Є.**, д.т.н., професор, заслужений працівник народної освіти України, член-кореспондент Національної академії педагогічних наук України, ректор Хмельницького національного університету
Заступник головного редактора	**Войнаренко М. П.**, д. е. н., професор, заслужений діяч науки і техніки України, член-кореспондент Національної академії наук України, проректор з науково-педагогічної та наукової роботи, перший проректор Хмельницького національного університету
Голова редакційної колегії серії "Технічні науки"	**Бойко Ю.М.**, д. т. н., професор кафедри телекомунікацій та радіотехніки, начальник науково-дослідної частини Хмельницького національного університету
Відповідальний секретар	**Гуляєва В. О.**, завідувач відділом інтелектуальної власності і трансферу технологій Хмельницького національного університету

Ч л е н и р е д к о л е г і ї

Технічні науки

Березненко М.П., д.т.н., Бойко Ю.М., д.т.н. Бубулис Алгимантас, д.т.н. (Литва), Гордєєв А.І., д.т.н., Грабко В.В., д.т.н., Диха О.В., д.т.н., Жултовський Б., д.т.н. (Польща), Зубков А.М., д.т.н., Каплун В.Г., д.т.н., Карван С.А., д.т.н., Карташов В.М., д.т.н., Кичак В.М., д.т.н., Кіницький Я.Т., д.т.н., Коробко Є.В., д.т.н. (Білорусія), Костогриз С.Г., д.т.н., Лунтовський А.О., д.т.н. (Німеччина), Мазур М.П., д.т.н., Мандзюк І.А., д.т.н., Мартинюк В.В., д.т.н., Мельничук П.П., д.т.н., Мясіщев О.А., д.т.н., Натріашвілі Т.М., д.т.н. (Грузія), Нелін Є.А., д.т.н., Павлов С.В., д.т.н., Поморова О.В., д.т.н., Попов В., доктор природничих наук (Німеччина), Прохорова І.А., д.т.н., Рогатинський Р.М., д.т.н., Ройзман В.П., д.т.н., Рудницький В.Б., д.фіз.-мат.н., Сарібекова Д.Г., д.т.н., Семенко А.І., д.т.н., Сілін Р.І., д.т.н., Славінська А.Л., д.т.н., Сорокатий Р.В., д.т.н., Сурженко Є.Я., д.т.н. (Росія), Шинкарук О.М., д.т.н., Шклярський В.І., д.т.н., Щербань Ю.Ю., д.т.н., Ясній П.В., д.т.н.,Tomasz Kalaczynski, PhD (Польща), Elsayed Ahmed Elnashar, PhD (Египет)

Технічний редактор Горященко К. Л., к.т.н.
Редактор-коректор Броженко В. О.

Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету, протокол № 6 від 29.11.2017 р.

Адреса редакції: редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету"
Хмельницький національний університет
вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, Україна, 29016

☎ (038-2) 62-51-08 **web:** http://journals.khnu.km.ua/vestnik
e-mail: visnyk.khnu@gmail.com http://vestnik.ho.com.ua
http://lib.khnu.km.ua/visnyk_tup.htm

Зареєстровано Міністерством України у справах преси та інформації.
Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
Серія КВ № 9722 від 29 березня 2005 року

© Хмельницький національний університет, 2017
© Редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету", 2017

ЗМІСТ

МАШИНОЗНАВСТВО ТА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ В МАШИНОБУДУВАННІ

А.О. СЯСЬКИЙ, Н.В. ШЕВЦОВА, О.Ю. ДЕЙНЕКА
ПРЕСОВА ПОСАДКА ЗАМКНЕНОГО ПРУЖНОГО СТРИЖНЯ В ЕЛІПТИЧНИЙ ОТВІР НЕСКІНЧЕННОЇ ОРТОТРОПНОЇ ПЛАСТИНКИ 7

І.В. ПЕТКО, М.Й. БОНДАРЕНКО
ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ НИЗЬКОГО ТИСКУ УСТАНОВКИ ДЛЯ ГІДРОРІЗАННЯ 15

С.А. ПЛЕШКО, Ю.А. КОВАЛЬОВ
ВПЛИВ ЗМАЩЕННЯ ПАР ТЕРТЯ МЕХАНІЗМУ В'ЯЗАННЯ В'ЯЗАЛЬНИХ МАШИН НА ДОВГОВІЧНІСТЬ РОБОТИ КЛИНІВ 19

В.Ю. ЩЕРБАНЬ, Н.І. МУРЗА, А.М. КИРИЧЕНКО, М.І. ШОЛУДЬКО
ВИЗНАЧЕННЯ ПРИВЕДЕНОГО КОЕФІЦІЄНТУ ТЕРТЯ ДЛЯ КІЛЬЦЕВИХ ТА ТРУБЧАТИХ СПРЯМОВУВАЧІВ НИТКИ ТРИКОТАЖНИХ МАШИН 23

О.П. БУРМІСТЕНКОВ, Т.Я. БІЛА, В.В. СТАЦЕНКО
ОСНОВНІ НАПРЯМКИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ЗМІШУВАЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ ДЛЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ 28

Ю.В. БАТЫГИН, Е.А. ЧАПЛЫГИН, О.С. САБОКАРЬ, В.А. СТРЕЛЬНИКОВА
ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ ВО ВНУТРЕННЕЙ ПОЛОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СОЛЕНОИДА. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ 32

О.І. НЕКОЗ, О.В. БАТРАЧЕНКО, Н.В. ФІЛІМОНОВА
ОСОБЛИВОСТІ ГІДРОДИНАМІКИ М'ЯСНОЇ СИРОВИНИ ПРИ ЇЇ ПОДАЧІ ШНЕКОМ ВОВЧКА 37

П.С. МАЙДАН, Г.Ф. ВОРОНІН, Е.О. ЗОЛОТЕНКО, А.В. БУРЯК
ОЦІНКА СТІЙКОСТІ ЗАМКНУТОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ЧАСТОТНИХ КРИТЕРІЇВ 42

О.С. ПОЛІЩУК, П.Ф. ЗОЗУЛЯ, А.О. ПОЛІЩУК
УЗАГАЛЬНЕНА КЛАСИФІКАЦІЯ ФІЛАМЕНТІВ ДЛЯ 3D-ДРУКУ 51

С.Л. ГОРЯЩЕНКО, О.О. НИКИТИН, Ю.Ю. КУШНІР, С.В. УСПАЛЕНКО
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧОЇ СИСЕТЕМИ 60

РАДІОТЕХНІКА, ЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Д.О. ЯРОЩУК, О.А. МЯСИЩЕВ
УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ОБРАХУНКУ ВПЛИВУ ЗАГРОЗ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЗАКРИТОЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ 64

Т.О. ГОВОРУЩЕНКО, О.В. ПОМОРОВА
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОЦІНЮВАННЯ ДОСТАТНОСТІ ІНФОРМАЦІЇ ЩОДО ЯКОСТІ У СПЕЦИФІКАЦІЯХ ВИМОГ ДО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ 70

С.М. ЛИСЕНКО, Д.І. СТОПЧАК, В.В. САМОТЕС
МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ КІБЕР-ЗАГРОЗ НА ОСНОВІ ЕВОЛЮЦІЙНИХ АЛГОРИТМІВ 81

І.С. ПЯТІН, В.В. СЕРГЕЄВ
МОДЕЛЮВАННЯ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ З ЗАВАДОСТІЙКИМ КОДУВАННЯМ 89

О.О. ПЕТРОВА, Р.В. БУРМЕНСЬКИЙ
ЛОГІЧНЕ ПРОГРАМУВАННЯ В РОЗРОБЦІ ІНФОРМАЦІЙНО-ДОВІДКОВОЇ СИСТЕМИ 92

С.М. ЛИСЕНКО, В.В. ГУМЕНЮК
МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ШКІДЛИВИХ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ НА ОСНОВІ АЛГОРИТМУ НАЙБЛИЖЧИХ СУСІДІВ 96

Н.С. СВИРНЕВСКИЙ
РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ СОЗДАНИЯ КОМПЛЕКСНОГО ЧЕРТЕЖА ИЗ ПРОЕКЦИЙ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ОБЪЕКТА В AUTOCAD 102

A. KASHTALIAN
SEGMENTATION OF TEXT INFORMATION IN NATURAL SCENE IMAGES 106

О.С. ПИВОВАР
ВАРІАНТ СТРУКТУРНОЇ БУДОВИ ШИРОКОСМУГОВОЇ АНАЛОГОВОЇ СИСТЕМИ ПРИХОВАНОГО ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ СИГНАЛІВ ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ 111

В.І. СТЕЦЮК, О.С. РАВЧУК
ТЕНДЕНЦІЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ КВАРЦОВИХ РЕЗОНАТОРІВ 117

В.І. ЛУЖАНСЬКИЙ, Л.В. КАРПОВА, В.А. ВОЛОШИНА
ВПЛИВ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ БАЗОВОЇ СТАНЦІЇ В СИСТЕМАХ РУХОМОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ НА ЙМОВІРНІСТЬ БІТОВОЇ ПОМИЛКИ НА ВХОДІ ПРИЙМАЧА МОБІЛЬНОГО ТЕРМІНАЛУ ТА ВІДСТАНІ МІЖ НИМИ 126

В.І. ЛУЖАНСЬКИЙ, Д.А. МАКАРИШКІН, М.Ю. НАРКЕВИЧ
ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАВАДОВОЇ ОБСТАНОВКИ ПІД ЧАС РУХУ МОБІЛЬНОЇ СТАНЦІЇ ПРИ РІЗНИХ ПОТУЖНОСТЯХ ТА ВИСОТАХ АНТЕН БАЗОВИХ СТАНЦІЙ В УМОВАХ ЗАБУДОВИ МІСТА 134

І.В. ГУЛА, Л.В. КАРПОВА, Л.О. КОВТУН, О.І. ПОЛІКАРОВСЬКИХ
МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИНТЕЗАТОРІВ DDS 142

В.М. МЕЛЬНИЧУК, О.І. ПОЛІКАРОВСЬКИХ
АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ЦИФРО-АНАЛОГОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ У ПРЯМИХ ЦИФРОВИХ СИНТЕЗАТОРАХ ЧАСТОТИ (DDS) 152

K.L. HORIASCHENKO, O.E. ZEMLANSKIY
A COMPARISON OF REFLECTOMETRY METHODS FOR LOCATION FAULT IN TELECOMMUNICATION CABLES 159

О.В. МАСТИКАШ
ОСОБЛИВОСТІ КЛАСИФІКАЦІЇ ТА АНАЛІЗУ ВіРТУАЛЬНИХ СПІЛЬНОТ 165

В.І. СТЕЦЮК, В.А. НІКІТОВ
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЛІФТОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ ШЛЯХОМ ВВЕДЕННЯ СИГНАЛУ ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ 169

А.І. СЕМЕНКО, Н.І. БОКЛА, К.О. ДОМРАЧЕВА, Є.О. ШЕСТОПАЛ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНА СИСТЕМА З ПОКРАЩЕНИМ ПРИЙМАННЯМ АМПЛІТУДНО-МАНІПУЛЬОВАНОГО СИГНАЛУ 178

І.В. ГУЛА, В.В. МІШАН, С.О. КОВАЛИШИН, Я.В. КІЛІХЕВИЧ
АНАЛІЗ СУЧАСНОЇ ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ ТА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ СИСТЕМ БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ МІМО 182

В.С. ПЕТРУШАК , С.В. САМОЛЮК
РОЗРОБКА ЦИФРОВОГО ГЕНЕРАТОРА ПЕРІОДИЧНИХ СИГНАЛІВ НА БАЗІ ПРЯМОГО МЕТОДУ СИНТЕЗУ ЧАСТОТИ І ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ЙОГО ФУНКЦІОНАЛЬНИХ БЛОКІВ 187

М.М. КАСЯНЧУК, І.З. ЯКИМЕНКО, С.В. ІВАСЬЄВ, Н.М. МАНДЕБУРА, В.М. НЕМІШ
ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК АПАРАТНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДІВ ПОШУКУ ОБЕРНЕНОГО ЕЛЕМЕНТА ЗА МОДУЛЕМ 191

О.М. БЕРЕЗЬКИЙ, К.М. БЕРЕЗЬКА, Г.М. МЕЛЬНИК, Т.М. ДОЛИНЮК
СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ КОЕФІЦІЄНТА СТРУКТУРНОЇ АТИПІЇ ПАТОЛОГІЧНИХ СТАНІВ МОЛОЧНОЇ ЗАЛОЗИ 198

Н.В. ТІТОВА, С.В. КОСТІШИН, М.В. МОСКОВКО
АЛГОРИТМІЧНО-ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ УПРАВЛІННЯ ІНКУБАЦІЙНИМ ПРОЦЕСОМ ОСЕТРОВИХ 204

К.А. НОВОХАТСЬКА
УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ АВТОМАТИЗОВАНОГО ОНОВЛЕННЯ МАТЕРІАЛІЗОВАНИХ ПРЕДСТАВЛЕНЬ ШЛЯХОМ ПОШИРЕННЯ ЇЇ НА ІЄРАХІЧНІ ТА АНАЛІТИЧНІ ЗАПИТИ 208

I.V. TROTSYSHYN, G.YU. SHOKOTKO
IMPLEMENTATION OF THE PRINCIPLES OF THE QUANTUM THEORY OF MEASUREMENT OF AMPLITUDE SIGNAL PARAMETERS, AS THE HIGHER LEVEL OF THE PHASE-DIMENSIONAL MEASUREMENT THEORY 216

О.В. МАЗУРЕЦЬ
ОНТОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО ПОБУДОВИ СЕМАНТИЧНОЇ МОДЕЛІ НАВЧАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ..... 223

ТЕХНОЛОГІЇ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

О.П. СИРОТЕНКО, С.М. ШЕВЧУК
УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕСКІЗНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ЖІНОЧИХ СУКОНЬ ЗА МОТИВАМИ СТИЛЮ МОДЕРН 230

О.С. ВАСИЛЬЄВА, А.С. ДВОЙНИХ, С.М. ЧЕРВОНЮК, І.В. ВАСИЛЬЄВА, М.В. КОЛОСНІЧЕНКО
СИСТЕМАТИЗАЦІЯ АСОРТИМЕНТУ ТА КОЛЬОРОВИХ РІШЕНЬ ФОРМЕНОГО ОДЯГУ ДЛЯ ДІТЕЙ МОЛОДШОЇ ШКІЛЬНОЇ ГРУПИ 237

М.О. МАРУХЛЕНКО, О.Р. МОКРОУСОВА
ОПТИМАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ ДУБЛЕННЯ ШКІРИ З ВИКОРИСТАННЯМ МОНТМОРИЛОНІТУ 244

А.Я. ГАНЗЮК, О.І. СТРЕМЕЦЬКИЙ
СТРУКТУРНО-СОРБЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ САПОНІТОВИХ ГЛИН, МОДИФІКОВАНИХ ПАР 249

О.В. КОНДРАТЮК, Е.Є. КАСЬЯН
РОЗРОБКА СКЛАДІВ ПОКРИВНИХ КОМПОЗИЦІЙ ДЛЯ ОЗДОБЛЕННЯ НАТУРАЛЬНИХ ШКІР 255

Г.А. БОЙКО, А.В. КУТАСОВ
ВИЗНАЧЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОНОПЛЯНОГО КОТОНІНУ ТА ЗМІНА ЇХ ПІД ДІЄЮ ПРОПАРЮВАННЯ 263

Є.О. ГОЛІНКА
ПРОБЛЕМАТИКА НАНЕСЕННЯ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ НА РУЛОННІ ТЕКСТИЛЬНІ МАТЕРІАЛИ 267

Н.М. ЗАЩЕПКІНА
ТЕМПЕРАТУРНІ ДЕФОРМАЦІЇ ОРІЄНТОВАНИХ ПЛІВОК 272

О.М. СИНЮК
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ ТА СТУПЕНЯ ВИТЯЖКИ ПОЛІМЕРУ НА ЙОГО МІЦНІСТЬ 278

М.Є. СКИБА, О.М. СИНЮК
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ 2786

ОБМІН ПРАКТИЧНИМ ДОСВІДОМ, ТЕХНОЛОГІЯМИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Ю.П. ЗАСПА
КОНТАКТНЕ ДИНАМО ЯК ГЕНЕРАТОР КОГЕРЕНТНИХ (КООПЕРАТИВНИХ) КОСМІЧНИХ ФОРМ РУХУ ТА МЕХАНІЗМ ОБ'ЄДНАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО, ГРАВІТАЦІЙНОГО, СИЛЬНОГО І СЛАБКОГО ПОЛІВ. ЧАСТИНА ІХ. НОВА СТАРА ФІЗИКА 293

В.В. ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ
УСУНЕННЯ НЕВІДПОВІДНОСТЕЙ З ВОЛОГОЮ ЗАЛІЗОРУДНОГО КОНЦЕНТРАТУ ПІД ЧАС ТОРГІВЛІ З КИТАЄМ 307

МАШИНОЗНАВСТВО ТА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ В МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 539.3

А.О. СЯСЬКИЙ, Н.В. ШЕВЦОВА
Рівненський державний гуманітарний університет
О.Ю. ДЕЙНЕКА
Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

ПРЕСОВА ПОСАДКА ЗАМКНЕНОГО ПРУЖНОГО СТРИЖНЯ В ЕЛІПТИЧНИЙ ОТВІР НЕСКІНЧЕННОЇ ОРТОТРОПНОЇ ПЛАСТИНКИ

Пропонується розв'язок мішаної контактної задачі про посадку з натягом замкненого ізотропного пружного кільця в еліптичний отвір нескінченної ортотропної пластинки, яка перебуває в умовах однорідного узагальненого плоского напруженого стану на нескінченності. Деформації контуру отвору в пластинці (відносне видовження і кут повороту нормалі) як функції контактних зусиль і зовнішнього навантаження надано інтегральними співвідношеннями з ядрами Гільберта. Моделюючи кільце замкненим пружним стрижнем великої кривини, його напружено-деформований стан описано основними рівняннями одновимірної теорії криволінійних стрижнів, в яких враховано що поверхня контакту пластинки і стрижня не співпадає з його серединною поверхнею. Деформації крайнього поздовжнього волокна стрижні, яке контактує з пластинкою подано залежностями Кіхргофа від внутрішніх сил і згинальних моментів, що діють в поперечних перерізах стрижня і віднесені до його осі. Крайові умови задачі на межі сполучення пластинки і кільця за відсутності сил тертя сформульовано у вигляді рівності їх кривин. Математичну модель задачі, яка описує напружено-деформований стан пластинки і кільця, побудовано у вигляді системи інтегральних і диференціальних рівнянь для визначення контактних зусиль, що виникають у зоні контакту, та внутрішніх зусиль в кільці. Досліджено структуру розв'язку задачі та визначено умови однозначності кута повороту нормалі до лінії контакту пластинки і кільця. Методом скінченних тригонометричних сум задача зведена до системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Запропонованим методом досліджено вплив на розподіл напружень у контактуючих тілах форми отвору, ортотропії матеріалу пластинки, зовнішнього навантаження та величини натягу. Встановлено мінімальний натяг, за якого можливе розмикання контакту між пластинкою і кільцем в одній або декількох точках. Показано, що ортотропія матеріалу суттєво змінює напружено-деформований стан кільця, а натяг практично не впливає на розподіл кільцевих зусиль на контурі отвору в пластинці.

Ключові слова: напружена посадка, еліптичний отвір, пружне ребро, інтегральні і диференціальні рівняння, ортотропна пластинка, мінімальний натяг.

A.O. SIASKYI, N.V. SHEVTSOVA
Rivne State University of Humanities, Ukraine
O.Y. DEJNEKA
National University of Water Management and Natural Resources, Rivne, Ukraine

PRESS LANDING OF THE CLOSED RESILIENT ROD IN ELLIPTIC OPENING OF INFINITE ORTHOTROPIC PLATE

The solution of the mixed contact problem about landing with the tension of a closed isotropic resilient ring in an elliptic opening of an infinite orthotropic plate, which is located in the conditions of a homogeneous generalized plane stressed state at infinity is proposed. The deformation of the contour of the opening in the plate (relative lengthening and corner of turn of normal), as a function of contact forces and external loading, is given by integral relations with the Hilbert nuclei. Modeling a ring with a closed resilient rod of a large curvature, its stress-strain state is described by the basic equations of the one-dimensional theory of curvilinear rods, which take into account that the contact surface of the plate and the rod does not coincide with its median surface. The deformation of the extreme longitudinal fiber of the rod, which is in contact with the plate, is given by the dependences of Kichrhof on the internal forces and bending moments acting in the transverse sections of the rod and assigned to its axis. The boundary conditions of the problem on the boundary between the plate and the ring in the absence of frictional forces are formulated in the form of the equality of their curvatures. A mathematical model of a problem that describes the stress-strain state of a plate and a ring is constructed in the form of a system of integral and differential equations for determining the contact forces occurring in the contact area and internal forces in the ring. The structure of the solution of the problem is studied and the conditions of unambiguity of the corner of turn of the normal to the contact line of the plate and ring are determined. By the method of finite trigonometric sums problem is reduced to a system of linear algebraic equations. The proposed method investigated the influence on the distribution of stresses in the contacting bodies of the shape of the opening, the orthotropy of the plate material, the external load and the magnitude of the tension. The minimum tension is established, which allows for the opening of the contact between the plate and the ring at one or more points. It is shown that the orthotropy of a material substantially changes the stress-deformed state of the ring, but the tension practically does not affect the distribution of the ring forces on the contour of the opening in the plate.

Keywords: tense landing, elliptic opening, resilient rib, minimum pull, elliptic opening, integral and differential equations, orthotropic plate, minimum pull.

Вступ

У машинобудуванні для передачі обертального руху широко використовуються пресові з'єднання, за допомогою яких відбувається нерухоме сполучення валів з маховиками, шківами пасових передач, зубчатими колесами. Як показує досвід експлуатації і проведені теоретичні та експериментальні дослідження від роботоздатності таких з'єднань суттєво залежить довговічність інших деталей передач. Тому підвищення їх міцності набуває важливого значення в загальній проблемі надійності машин.

Пресові з'єднання характеризуються високим рівнем концентрації напружень у зоні контакту пружних тіл, що негативно впливає на їх міцність Задача визначення напружено-деформованого стану в таких з'єднаннях є актуальною проблемою сучасного машинобудування. Ця проблема стала особливо актуальною в зв'язку з широким використанням в інженерній практиці нових композитних матеріалів.

Найбільш повно в науковій літературі проблема розрахунку напружених посадок з натягом досліджена для масивних ізотропних циліндричних тіл, обмежених круговими поверхнями. При теоретичному дослідженні з'єднань об'ємних деталей з натягом використовувалися як методи теорії пружності [1–3], так і числові методи [4, 5]. Для визначення напружень у найбільш важливих для практики з'єднаннях використано ефективні експериментальні методи, зокрема поляризаційно-оптичний [6] та метод заморожування [7]. Огляд досліджень напруженого стану в масивних ізотропних тілах з круговими циліндричними поверхнями, з'єднаних між собою натягом, наведено в роботах [2, 4].

Розв'язок задачі про напружену посадку абсолютно жорсткого диска в криволінійний отвір нескінченної ізотропної (ортотропної) пластинки при передачі моментного навантаження здійснено в [8, 9]. Методом скінченних тригонометричних сум досліджується вплив на напружений стан пластинки форми отвору, матеріалу пластинки, натягу та величини обертального моменту.

Проблема визначення напружень у з'єднаних з натягом циліндричних тілах, одне з яких тонкостінне, вивчена недостатньо.

Задачі про пресову посадку замкнених пружних стрижнів у криволінійний отвір нескінченної ізотропної (ортотропної) пластинки з використанням особливих крайових умов у інтегральній формі розглянуто в [10, 11]. Методом комплексних рядів Фур'є досліджується напружено-деформований стан пластинки і стрижня, а також встановлюється мінімальний натяг, за якого не порушується контакт між сполучуваними тілами.

В уточненій постановці пропонується розв'язок задачі про пресову посадку замкненого стрижня великої кривини в еліптичний отвір нескінченної ортотропної пластинки. Для нескінченної ізотропної пластинки з криволінійним отвором аналогічна задача досліджена в [12]. Для кругового отвору в нескінченній ізотропній та ортотропній пластинках такі задачі розглянуті в роботах [13, 14].

Постановка і основні рівняння задачі

Розглянемо нескінченну ортотропну пластинку товщиною $2h$ з еліптичним отвором, обмеженим гладкою циліндричною поверхнею. Серединну площину пластинки віднесемо до декартової (x, y) і полярної (r, δ) систем відліку з полюсом у центрі отвору. Лінію перетину серединної площини з поверхнею отвору позначимо через Γ і будемо називати контуром отвору. Вважаємо, що основні напрямки ортотропії матеріалу пластинки співпадають з напрямками координатних осей і осей еліпса.

В отвір пластинки з натягом $\Delta = \text{const}$ запресоване замкнене пружне ізотропне кільце сталого прямокутного поперечного перерізу $2h_0 \times 2\eta$ ($2h_0$ – висота кільця, 2η – його ширина). Не порушуючи загальності вважаємо, що величина Δ має порядок пружних зміщень точок контуру Γ.

Пружна система „пластинка-кільце" перебуває в умовах узагальненого плоского напруженого стану, створеного однорідним навантаженням на нескінченності, яке задається рівномірно розподіленими зусиллями p і q, що діють у напрямках координатних осей.

Розв'язання задачі передбачає визначення компонент напружено-деформованого стану на контурі Γ в пластинці та в пружному кільці, а також дослідження впливу на ці величини ортотропії матеріалу пластинки, величини натягу і зовнішнього навантаження.

Деформації контуру Γ в пластинці при заданому її навантаженні на підставі [15] визначаються зі співвідношень

$$\varepsilon_\lambda^* = \frac{1}{2E_x h}\left\{c_1 T_\rho^*(\lambda) + c_2 G(\lambda) - c_3 H(\lambda) + \tilde{\varepsilon}_\lambda^0\right\}; \qquad V^* = \frac{1}{2E_x h}\left\{c_1 S_{\rho\lambda}^*(\lambda) + c_3 G(\lambda) + c_4 H(\lambda) + \tilde{V}^0\right\}, \tag{1}$$

в яких введено позначення

$$\begin{gathered}
c_1 = w_2 - \nu_x; \quad c_2 = \frac{w_1}{2}\left[(1-w_2)\cos^2\lambda - 1\right]; \quad c_3 = \frac{w_1}{2}(1-w_2)\sin\lambda\cos\lambda; \quad c_4 = \frac{w_1}{2}\left[(1-w_2)\sin^2\lambda - 1\right]; \\
T_\rho = \frac{\alpha T_\rho^* + \beta S_{\rho\lambda}^*}{\alpha^2+\beta^2}; \quad S_{\rho\lambda} = \frac{\alpha S_{\rho\lambda}^* - \beta T_\rho^*}{\alpha^2+\beta^2}; \quad \varepsilon_\lambda = \frac{\alpha\varepsilon_\lambda^* + \beta V^*}{\alpha^2+\beta^2}; \quad V = \frac{\alpha V^* - \beta\varepsilon_\lambda^*}{\alpha^2+\beta^2}; \quad \alpha + i\beta = \omega'(\sigma); \\
\sigma = e^{i\lambda}; \quad \tilde{\varepsilon}_\lambda^0 + i\tilde{V}^0 = \frac{p}{2}\left[a + b(w_1 - w_2) - (a + b(w_1 + w_2))e^{-2i\lambda}\right] + \frac{q}{2}w_2\left[a(w_1 - 1) + bw_2 + (a(1 + w_1) + bw_2)e^{-2i\lambda}\right]; \\
w_1 = \beta_1 + \beta_2; \quad w_2 = \beta_1\beta_2; \quad G(\lambda) = \frac{1}{\pi}\oint_\gamma\left[T_\rho^*(t) - S_{\rho\lambda}^*(t)ctg\frac{\lambda - t}{2}\right]dt; \quad H(\lambda) = \frac{1}{\pi}\oint_\gamma\left[S_{\rho\lambda}^*(t) + T_\rho^*(t)ctg\frac{\lambda - t}{2}\right]dt;
\end{gathered} \tag{2}$$

$\omega(\xi) = x + iy = R_0\left(\xi + \frac{\varepsilon}{\xi}\right)$ – функція, яка здійснює конформне відображення зовнішності одиничного кола γ в площині $\xi = \tilde{\rho}e^{i\lambda}$ на область, яку займає серединна площина пластинки; $R_0 = \frac{a+b}{2} = 1$; $\varepsilon = \frac{a-b}{a+b}$; a, b – півосі еліпса; $a = 1 + \varepsilon$; $b = 1 - \varepsilon$; E_x, ν_x – модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона матеріалу пластинки в

напрямку осі Ox; β_1, β_2 – корені характеристичного рівняння [16]; ε_λ, V – відносне видовження контуру Γ і кут повороту нормалі до нього; $i=\sqrt{-1}$.

Якщо функції T_ρ^*, $S_{\rho\lambda}^*$ будуть відомі, то кільцеві зусилля на Γ визначаються за формулою [15]

$$T_\lambda = -\frac{(1+\beta_1)(1+\beta_2)}{4\Delta_1\Delta_2}\left[\left(l_1l_2+(a+b)l_4\frac{\sin^2 2\lambda}{4}\right)R_1+((a+b)l_1-l_2l_4)\frac{\sin 2\lambda}{2}R_2\right]-$$
$$-\frac{(1-\beta_1)(1-\beta_2)}{4\Delta_1\Delta_2}\left[\left((b-a)l_4\frac{\sin^2 2\lambda}{4}-l_1l_3\right)\widetilde{R}_3+(l_3l_4+(b-a)l_1)\frac{\sin 2\lambda}{2}\widetilde{R}_4\right]+T_\lambda^0, \tag{3}$$

де

$$T_\lambda^0=\frac{l_3}{\Delta_1\Delta_2}\left[p\left(l_1+l_4\sin^2\lambda\right)+qw_2\left(l_4\cos^2\lambda-l_1\right)\right];\quad l_1=a^2\sin^2\lambda-b^2w_2\cos^2\lambda;\quad l_2=a\sin^2\lambda-b\cos^2\lambda;$$
$$l_4=abw_1;\ l_3=a\sin^2\lambda+b\cos^2\lambda;\quad \Delta_j=a^2\sin^2\lambda+b^2\beta_j^2\cos^2\lambda\ \ (j=1,2);\quad R_1=-2T_\rho^*+G(\lambda); \tag{4}$$
$$R_2=-2S_{\rho\lambda}^*+H(\lambda);\ R_3=4T_\rho^*-R_1;\ R_4=4S_{\rho\lambda}^*+R_2;\ \widetilde{R}_3=R_3\cos 2\lambda+R_4\sin 2\lambda;$$
$$\widetilde{R}_4=R_4\cos 2\lambda-R_3\sin 2\lambda.$$

Деформації кільця контактними зусиллями описуються основними рівняннями одновимірної теорії криволінійних стрижнів великої кривини [17]:

– диференціальні рівняння рівноваги елемента стрижня

$$T_\rho=\frac{N}{\rho}-\frac{dQ}{ds},\qquad S_{\rho\lambda}=-\frac{dN}{ds}-\frac{Q}{\rho},\qquad \frac{dL_b}{ds}-\left(1-\frac{\eta}{\rho}\right)Q=0; \tag{5}$$

– фізичні співвідношення Кірхгофа для крайнього поздовжнього волокна, яке контактує з пластинкою

$$\varepsilon_\lambda^{(\tilde{n})}=\frac{N}{g_4}+\left(\frac{1-r_0}{\rho}\right)\frac{RL_b}{g_2};\qquad \frac{d\theta_b}{d\theta}=\frac{N}{g_4}+\frac{RL_b}{g_2}. \tag{6}$$

У цих рівняннях: $\varepsilon_\lambda^{(\tilde{n})}$, θ_b – відносне видовження і кут повороту нормалі в точках крайнього волокна стрижня; $ds=\rho d\theta$ – елемент дуги цього волокна; ρ – радіус кривини недеформованого контуру Γ в пластинці; $e^{i\theta}=e^{i\lambda}\omega'(\sigma)/|\omega'(\sigma)|$; N, Q, L_b – внутрішні поздовжня і поперечна сили та згинальний момент, які виникають у поперечних перерізах стрижня і віднесені до його осі; $g_4=E_0F_0$ – жорсткість стрижня на розтяг (стиск); $g_2=\omega_0 g_4$ – жорсткість на згин в площині його осі; r_0, R – радіуси кривини нейтрального для чистого згину і осьового волокон стрижня; E_0 – модуль Юнга матеріалу стрижня; θ – кут нахилу поперечного перерізу стрижня до осі Ox.

Кривини деформованого контуру Γ і зовнішнього поздовжнього волокна в стрижні визначаються за формулами [12]

$$k(\lambda)=\frac{1}{\rho}\left[1-\varepsilon_\lambda+\frac{dV}{d\theta}\right];\qquad k^{(c)}(\lambda)=\frac{1}{\rho+\Delta}\left(1-\varepsilon_\lambda^{(c)}+\frac{d\theta_b}{d\theta}\right), \tag{7}$$

в яких $\rho\approx\rho+\Delta$, $\Delta>0$.

Крайові умови сумісного деформування пластинки і кільця формулюємо у вигляді рівності їх кривин на ділянці контакту. При відсутності тертя ці умови, на підставі (7), можна подати у вигляді

$$\varepsilon_\lambda-\frac{dV}{d\theta}-\varepsilon_\lambda^{(c)}+\frac{d\theta_b}{d\theta}=\frac{\Delta}{\rho};\qquad S_{\rho\lambda}=0,\quad \lambda\in[0;2\pi]. \tag{8}$$

Підставляючи (1), (2). (6) в крайові умови (8), одержимо після певних перетворень

$$\left[\alpha+\frac{\alpha^2+\beta^2}{1-\varepsilon^2}\left(2(1-\alpha)-\frac{4\beta^2}{\alpha^2+\beta^2}+\beta\frac{d}{d\lambda}\right)\right]\left[c_1T_\rho^*(\lambda)+c_2G(\lambda)-c_3H(\lambda)+\widetilde{\varepsilon}_\lambda^0\right]+$$
$$+\left[\beta-\frac{\alpha^2+\beta^2}{1-\varepsilon^2}\left(2\beta-\frac{4\alpha\beta}{\alpha^2+\beta^2}+\alpha\frac{d}{d\lambda}\right)\right]\left[c_1S_{\rho\lambda}^*(\lambda)+c_3G(\lambda)+c_4H(\lambda)+\widetilde{V}^0\right]+ \tag{9}$$
$$+\frac{2E_xh\left(\alpha^2+\beta^2\right)}{g_2}\frac{r_0R}{\rho}L_b=\frac{2E_xh\Delta}{\rho}\left(\alpha^2+\beta^2\right);\quad \alpha S_{\rho\lambda}^*-\beta T_\rho^*=0,\quad \lambda\in[0;2\pi].$$

Залежності (9) доповнюємо рівняннями рівноваги (5), перетвореними до вигляду

$$\frac{\rho}{\alpha^2+\beta^2}\left(\alpha T_\rho^*(\lambda)+\beta S_{\rho\lambda}^*(\lambda)\right)=N(\theta)+\frac{d^2N(\theta)}{d\theta^2};\quad \frac{dN(\theta)}{d\theta}+Q(\theta)=0;\quad \frac{dL_b(\theta)}{d\theta}-RQ(\theta)=0;\quad \lambda,\theta\in[0;2\pi]. \tag{10}$$

Співвідношення (9), (10) визначають математичну модель розглядуваної задачі і служать для визначення функцій $T_\rho^*(\lambda)$, $S_{\rho\lambda}^*(\lambda)$, $N(\theta)$, $Q(\theta)$, $L_b(\theta)$, через які компоненти напруженого стану на контурі Γ в пластинці визначаються за формулами (2), (3), а нормальні напруження в крайніх поздовжніх волокнах ребра на підставі (6) – за законом Гука в його одновимірній формі [18]

$$\sigma_1^{(c)} = \sigma^{(c)}(\rho) = \frac{1}{F_0}\left(N + \left(1 - \frac{r_0}{\rho}\right)\frac{R\,L_b}{\omega_0}\right); \qquad \sigma_2^{(c)} = \sigma^{(c)}(\rho - 2\eta) = \frac{1}{F_0}\left(N + \left(1 - \frac{r_0}{\rho - 2\eta}\right)\frac{R\,L_b}{\omega_0}\right). \tag{11}$$

Максимальні дотичні напруження в осьовому волокні визначаються за формулою Журавського [18]

$$\tau_{\max}^{(c)} = \frac{3}{2}\frac{Q}{F_0}. \tag{12}$$

Наближений розв'язок задачі

Точний розв'язок системи (9), (10) знайти не вдається. Для її наближеного розв'язання використовуємо метод, запропонований в [12].

Оскільки контакт між пластинкою і кільцем неперервний, тому, враховуючи подвійну симетрію задачі і вигляд правих частин (9), (10), шукані функції подаємо скінченними тригонометричними сумами

$$T_\rho^*(\lambda) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{N_0} A_{2n}\cos 2n\lambda; \qquad S_{\rho\lambda}^*(\lambda) = \sum_{n=1}^{N_0} B_{2n}\sin 2n\lambda;$$
$$N(\theta) = \frac{C_0}{2} + \sum_{n=1}^{N_0} C_{2n}\cos 2n\theta; \quad Q(\theta) = \sum_{n=1}^{N_0} E_{2n}\sin 2n\theta; \quad \overline{L}_b(\theta) = R\,L_b(\theta) = \frac{D_0}{2} + \sum_{n=1}^{N_0} D_{2n}\cos 2n\theta. \tag{13}$$

При такому виборі цих функцій умова однозначності зміщень точок контуру Γ виконується тотожно, а умова однозначності кутів повороту поперечних перерізів кільця [12] визначає залежність

$$C_0\omega_0 + D_0 = 0. \tag{14}$$

З урахуванням (13), (14) і формули [12]

$$\frac{1}{\pi}\oint_\gamma \begin{Bmatrix}\cos mx\\ \sin mx\end{Bmatrix} ctg\,\frac{\lambda - t}{2}\,dt = 2\begin{Bmatrix}\sin mx\\ -\cos mx\end{Bmatrix}$$

співвідношення (9), (10) перетворимо до системи функціональних рівнянь для визначення сталих $A_0, C_0, D_0, A_{2n}, B_{2n}, C_{2n}, D_{2n}, E_{2n}$ $(n = 1, 2, ..., N_0)$

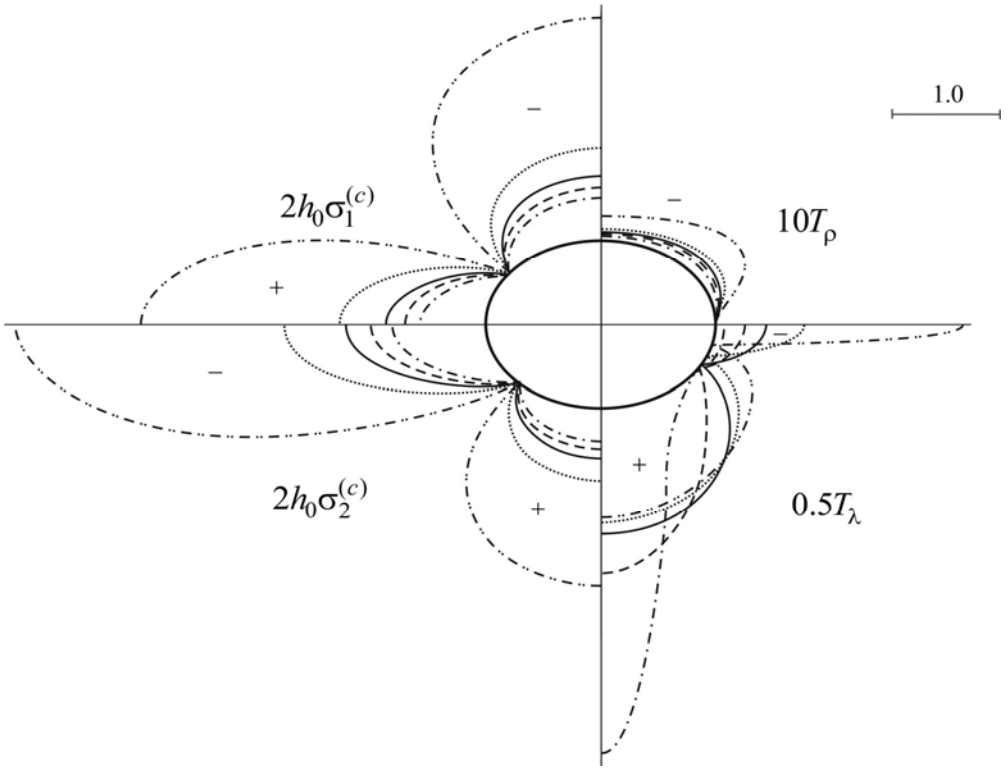


Рис. 1. Розподіл компонент напруженого стану (в долях p) при $\Delta = \Delta_{\min}$

$$\left[\alpha + \frac{\alpha^2+\beta^2}{1-\varepsilon^2}\left(2(1-\alpha) - \frac{4\beta^2}{\alpha^2+\beta^2} + \beta\frac{d}{d\lambda}\right)\right]\left\{(c_1+2c_2)\frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{N_0}[A_{2n}(c_1\cos 2n\lambda - 2c_3\sin 2n\lambda) + 2B_{2n}c_2\cos 2n\lambda] + \right.$$
$$\left. + \tilde{\varepsilon}_\lambda^0\right\} + \left[\beta - \frac{\alpha^2+\beta^2}{1-\varepsilon^2}\left(2\beta - \frac{4\alpha\beta}{\alpha^2+\beta^2} + \alpha\frac{d}{d\lambda}\right)\right]\left\{c_3A_0 + \sum_{n=1}^{N_0}[2A_{2n}c_4\sin 2n\lambda + B_{2n}(c_1\cos 2n\lambda + 2c_3\sin 2n\lambda)] + \tilde{V}^0\right\} +$$

$$+\frac{2E_x h\left(\alpha^2+\beta^2\right)}{g_2}\frac{r_0 R}{\rho}\left(\frac{D_0}{2}+\sum_{n=1}^{N_0}D_{2n}\cos 2n\theta\right)=\frac{2E_x h\Delta}{\rho}\left(\alpha^2+\beta^2\right);\quad \beta\frac{A_0}{2}+\sum_{n=1}^{N_0}\left(\beta A_{2n}\cos 2n\lambda-\alpha B_{2n}\sin 2n\lambda\right)=0;$$

$$\frac{\rho}{\alpha^2+\beta^2}\left[\alpha\frac{A_0}{2}+\sum_{n=1}^{N_0}\left(\alpha A_{2n}\cos 2n\lambda+\beta B_{2n}\sin 2n\lambda\right)\right]=\frac{C_0}{2}+\sum_{n=1}^{N_0}C_{2n}\left(1-4n^2\right)\cos 2n\theta;\quad 2nC_{2n}-E_{2n}=0;$$

$$\frac{d\rho}{d\theta}\frac{D_0}{2}+\sum_{n=1}^{N_0}\left[\left(2nR\sin 2n\theta+\frac{d\rho}{d\theta}\cos 2n\theta\right)D_{2n}+2nR^3C_{2n}\sin 2n\theta\right]=0;\quad \frac{C_0}{2}+\frac{D_0}{2\omega_0}=0;\quad \lambda,\theta\in[0;2\pi]. \qquad (15)$$

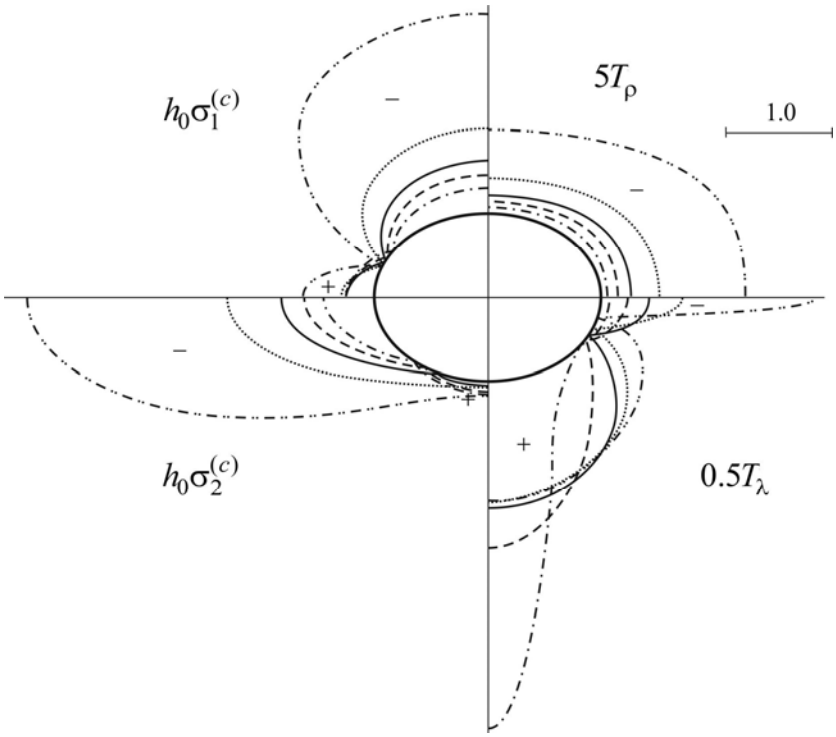


Рис. 2. Розподіл компонент напруженого стану (в долях p) при $\Delta=1.25\Delta_{\min}$

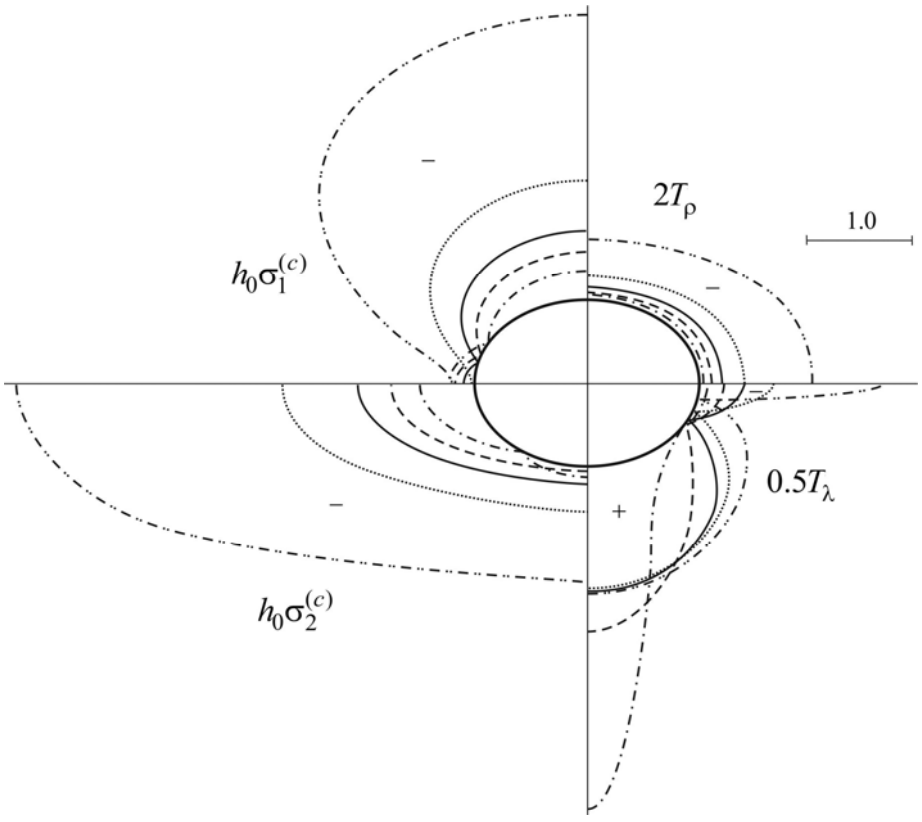


Рис. 3. Розподіл компонент напруженого стану (в долях p) при $\Delta=1.5\Delta_{\min}$

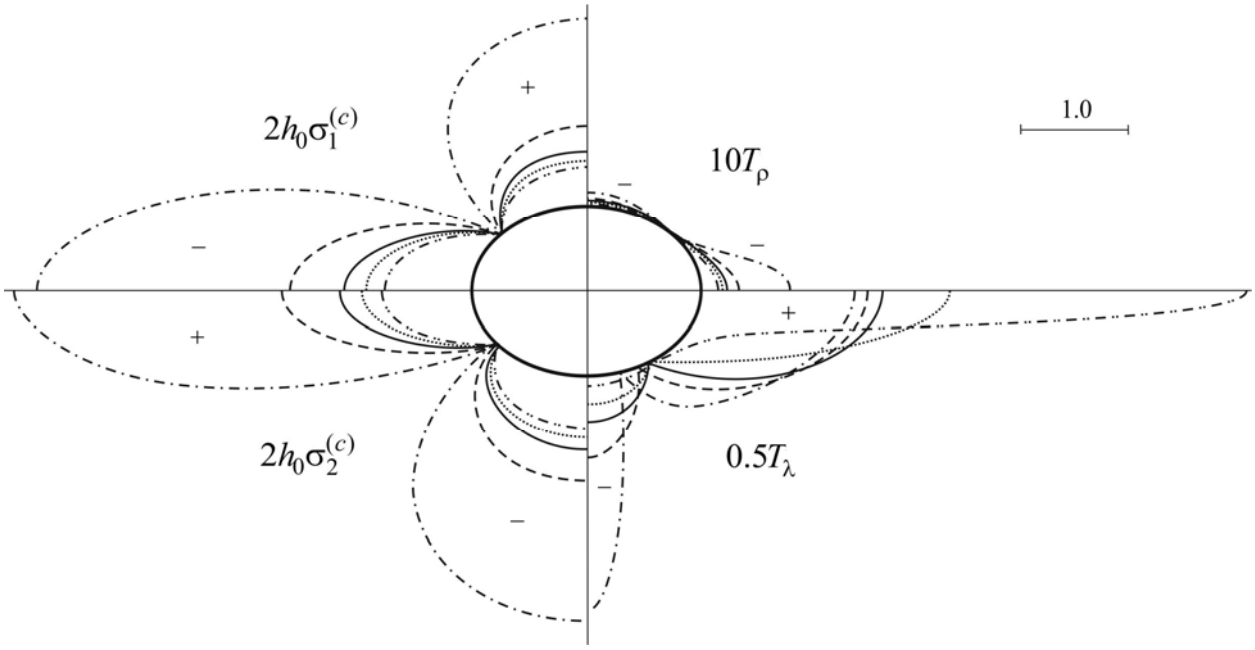


Рис. 4. Розподіл компонент напруженого стану (в долях q) при $\Delta = \Delta_{\min}$

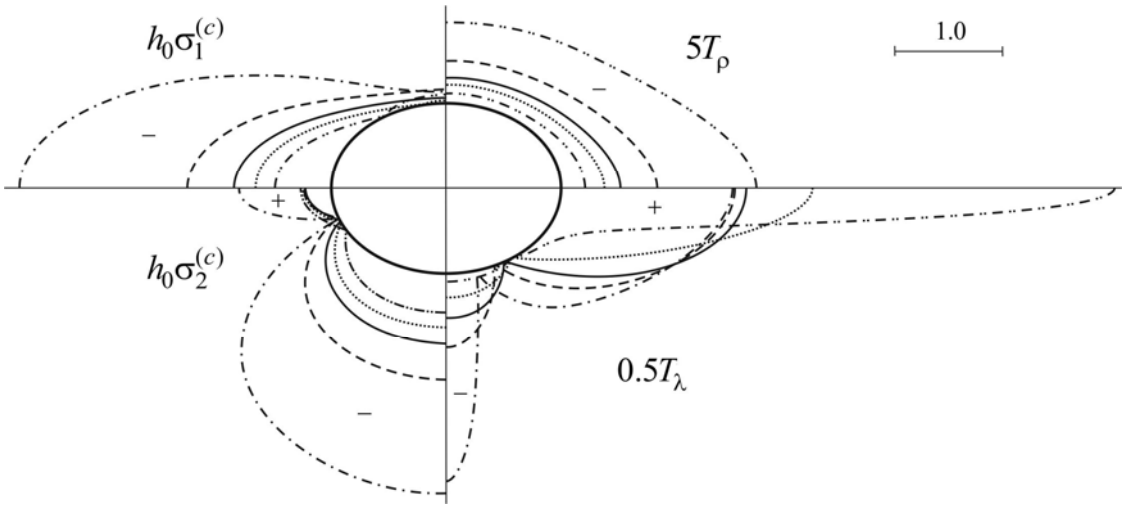


Рис. 5. Розподіл компонент напруженого стану (в долях q) при $\Delta = 1.25\Delta_{\min}$

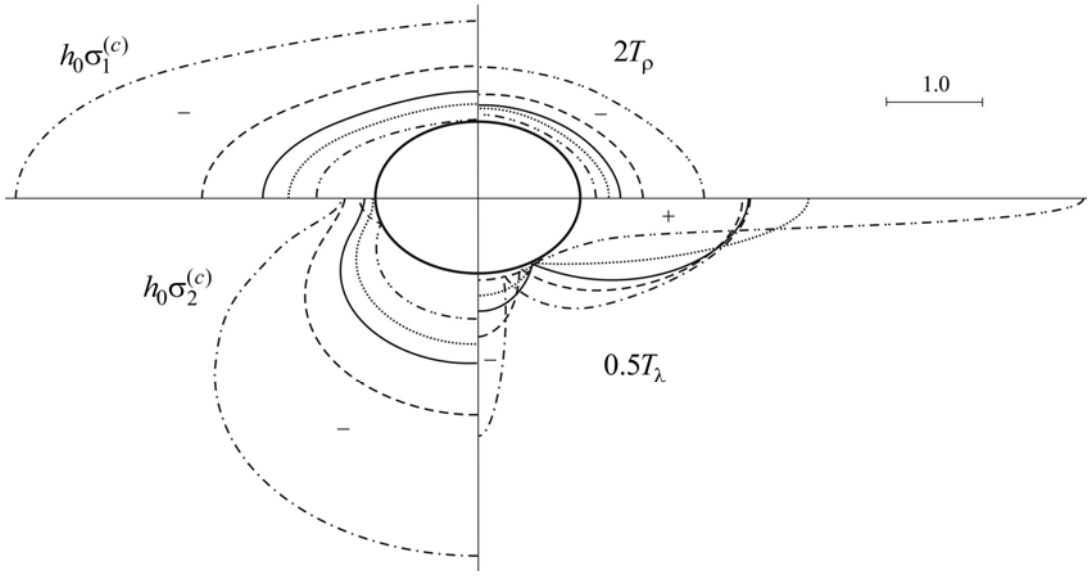


Рис. 6. Розподіл компонент напруженого стану (в долях q) при $\Delta = 1.5\Delta_{\min}$

Ця система має таку ж структуру, як і відповідна система для ізотропної пластинки [12], тому наближений метод її розв'язання переносимо без змін.

Якщо шукані сталі стануть відомі, то компоненти напруженого стану в пластинці та кільці визначаються за формулами (2), (3), (11), (12), (13).

Для ортотропної пластинки з еліптичним $(\varepsilon = 0.1)$ отвором і пружного кільця з параметрами $\eta = 0.05;\quad h/h_0 = 0.75;\quad \sqrt{E_x E_y}/E_0 = 0.5$ досліджено вплив ортотропії матеріалу, величини натягу та зовнішнього навантаження на розподіл контактних T_ρ і кільцевих T_λ зусиль на контурі Γ в пластинці та нормальних напружень $\sigma_1^{(c)}, \sigma_2^{(c)}$ у поздовжніх волокнах кільця. Результати числового розрахунку при $N_0 = 75,\ \Delta = \{\Delta_{\min}; 1.25\Delta_{\min}; 1.5\Delta_{\min}\},\ p = \{1; 0\},\ q = \{0; 1\}$ ілюструються на рис. 1–6 і в таблиці 1.

В таблиці 1 наведені: характеристики ортотропних матеріалів; лінії, які відповідають цим матеріалам на рис. 1–6; значення мінімального натягу $\Delta_{\min}$ і кути, що визначають положення точок розмикання контакту в системах відліку $(\tilde{\rho}, \lambda)$ і (r, δ). В чисельнику подано відповідні значення для випадку $p = 1;\ q = 0$, а в знаменнику – для $p = 0;\ q = 1$.

Таблиця 1

Матеріал пластинки	β_1	β_2	ν_x	E_x/E_y	$2\sqrt{E_x E_y}h\Delta_{\min}$	λ (град)	δ (град)	Лінії
епоксид-графіт	0.1430	1.4010	0.010	1/25	$\frac{4.9360}{0.5955}$	$\frac{0}{45.506}$	$\frac{0}{39.784}$	–··–·–·
епоксид-скло	0.4400	1.3100	0.083	1/3	$\frac{1.5360}{0.8946}$	$\frac{0}{43.483}$	$\frac{0}{37.810}$	.....
ізотропний матеріал	1	1	0.300	1	$\frac{0.7844}{1.2571}$	$\frac{0}{42.472}$	$\frac{0}{36.833}$	———
скло-епоксид	2.2712	0.7626	0.250	3	$\frac{0.4905}{2.2502}$	$\frac{0}{42.472}$	$\frac{0}{36.833}$	– – – – –
графіт-епоксид	6.9992	0.7144	0.250	25	$\frac{0.2548}{6.7484}$	$\frac{0}{42.472}$	$\frac{0}{36.833}$	–·–·–·–

Висновки

Аналізуючи результати проведених розрахунків, приходимо до таких висновків:

– ортотропія матеріалу пластинки суттєво впливає на розподіл компонент напруженого стану в пластинці і кільці, а також на величину мінімального натягу. При збільшенні відношення E_x/E_y мінімальний натяг для випадку $(p = 1;\ q = 0)$ зменшується, а для випадку $(p = 0;\ q = 1)$ – збільшується;

– кільцеві зусилля T_λ, які є визначальними на контурі отвору пластинки, практично не залежать від величини натягу, а нормальні контактні напруження і напруження в крайніх поздовжніх волокнах стрижня різко зростають при збільшенні натягу;

– при розтягу пластинки вздовж великої осі еліпса дві точки розмикання належать цій осі. Якщо пластинка розтягується вздовж малої осі еліпса, то існує чотири симетричні відносно координатних осей точки розмикання, положення яких практично не залежать від матеріалу пластинки;

– вплив поперечних сил, які виникають у перерізах кільця, на його напружений стан і напружений стан пластинки незначний.

Література

1. Тарабасов Н.Д. Расчет напряженных посадок в машиностроении / Н.Д. Тарабасов. – М. : Машгиз, 1961. – 364 с.

2. Семенов-Ежов И.Е. Проблема концентрации напряжений в соединениях с натягом (обзор) / И.Е. Семенов-Ежов // Вестник машиностр. МВТУ им. Н.Э. Баумана. – 2001. – № 4. – С. 37–40.

3. Тарабасов Н.Д. Новый прием решения задач прессовых соединений / Н.Д. Тарабасов // Расчеты на прочность, жесткость, устойчивость и колебания. – М. : Машиностороение, 1969. – Вып. 14. – С. 63–75.

4. Теплый М.И. Контактные задачи для областей с круговыми границами / М.И. Теплый. – Львов : Вища школа, Изд-во при Львов. ун-те, 1983. – 176 с.

5. Аниткин П.К. Определение напряжений от посадки круглых дисков в пластинку с криволинейным контуром / П.К Аниткин // Расчеты на прочность, жесткость, устойчивость и колебания. – М. : Машиностороение, 1965. – С. 43–47.

6. Савченко В.И. Исследование напряженного состояния прессовых соединений поляризационно-оптическим методом / В.И. Савченко // Прикл. механика, 1968. – Т. 4. – Вып. 8. – С.127–131.

7. Сурков А.И. Исследование напряжений в деталях, соединенных посадкой с применением

замораживания / А.И. Сурков, Г.П. Монахов-Ильин // Заводская лаборатория. – 1967. – № 6. – С. 755–756.

8. Комбель С.М. Посадка жорсткого диска в еліптичний отвір нескінченної ортотропної пластинки / С.М. Комбель // Машинознавство. – 2003. – № 8. – С. 25–31.

9. Сяський А.О. Граничні умови контактних задач для нескінченної пластинки з криволінійним отвором і жорсткого диска / А.О. Сяський, С.М. Комбель // Волинський математичний вісник. – Рівне, 2001. – Вип. 8. – С. 93–97.

10. Мартынович Т.Л. Впрессовка замкнутого стержня в криволинейное отверстие изотропной пластинки / Т.Л. Мартынович, М.К. Зварич // Прикл. механика. – 1974. – Т. 10. – № 9. – С. 46–52.

11. Мартынович Т.Л. О напряженном состоянии анизотропной пластинки, в криволинейное отверстие которой впрессован замкнутый стержень / Т.Л. Мартынович, М.К. Зварич, В.С. Щукин // Механика полимеров. – 1976. – № 9. – С. 304–309.

12. Сяський А.О. Напружена посадка замкненого пружного стрижня в криволінійний отвір нескінченної ізотропної пластинки / А.О. Сяський, Н.В. Шевцова, О.Ю. Дейнека // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2017. – № 5. – С. 32–38.

13. Дейнека О.Ю. Напружена посадка замкненого кругового стрижня в круговий отвір нескінченної ізотропної пластинки / О.Ю. Дейнека, В.А. Сяський // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування : збірник наукових праць. Технічні науки. – Рівне, 2016. – Вип. 2 (74). – С. 349–356.

14. Дейнека О.Ю. Напружена посадка замкненого кругового стрижня в круговий отвір нескінченної ортотропної пластинки / О.Ю. Дейнека, А.О. Сяський // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Збірник наукових праць. Технічні науки. – Рівне, 2016. – Вип. 3 (75). – С. 329–337.

15. Сяський А. Контактна взаємодія розімкнених стрижнів змінної жорсткості з еліптичним отвором нескінченної ортотропної пластинки / А. Сяський, Ю. Батишкіна // Вісник Тернопільського національного університету. – 2004. – Т. 9. – № 3. – С. 17–24.

16. Лехницкий С.Г. Анизотропные пластинки / С. Г. Лехницкий. – М. : Гостехиздат, 1957. – 464 с.

17. Shevtsova N. Stress distribution in an infinite pate with partly reinforced elliptical contour / Natalia Shevtsova, Andrii Syaskyi // Scientific Journal of the TNTU. – 2016. – № 1 (81). – С. 15–20.

18. Писаренко Г.С. Опір матеріалів / Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Е.С. Уманський. – К. : Вища школа, 2004. – 655 с.

References

1. Tarabasov N.D. Raschet napriazhennyh posadok v mashynostroenyy / N.D. Tarabasov. – M.: Mashgiz. 1961. – 364 s.

2. Semenov-Ezhov Y.E. Problema koncentracyy naprjazhenyi v soedinenyiah s natiahom (obzor) / Y.E. Semenov-Ezhov // Vestnyk mashinostr. MVTU im. N.E. Baumana. – M.: 2001. Volume 4. – S. 37–40.

3. Tarabasov N.D. Novyi pryem reshenyia zadach pressovyh soedynenyi / N.D. Tarabasov / Raschety na prochnost', zhestkost', ustoichyvost' y kolebanyia. M.: Mashynostoroenye. 1969. Volume 14. – S. 63–75.

4. Teplyi M.Y. Kontaktnye zadachy dlia oblastei s kruhovymy hranycamy / M.Y. Teplyi. – Lvov: Vyshha shkola. 1983. 176 s.

5. Anytkyn P.K. Opredelenye napriazhenyi ot posadky kruhlyh dyskov v plastynku s kryvolyneynym konturom / P.K. Anytkyn // Raschety na prochnost', zhestkost', ustojchivost' i kolebanija. M.: Mashynostoroenye. 1965. – S. 43–47.

6. Savchenko V.I. Issledovanye napriazhennogo sostoianyia pressovyh soedynenyi poliaryzacyonno-optycheskym metodom / V.I. Savchenko // Prykladnaia mehanyka – K.: 1968. Volume 4. Part 8. – S .127–131.

7. Surkov A.I. Issledovanye napriazhenyi v detaliah, soedynennyh posadkoi s prymenenyem zamorazhyvanyia / A.I. Surkov, G.P. Monahov-Il'in / Zavodskaia laboratoryia, 1967. Volume 6. – S. 755–756.

8. Kombel S.M. Posadka zhorstkoho diska v eliptychnyi otvir neskinchennoyi ortotropnoyi plastynky / S.M. Kombel // Mashynoznavstvo. Lviv: 2003. Volume 8. – S. 25–31.

9. Siaskyi A.O. Hranychni umovy kontaktnykh zadach dlya neskinchennoyi plastynky z kryvoliniynym otvorom i zhorstkoho dyska / A.O. Syaskyi, S.M. Kombel // Volynskyy matematychnyy visnyk. Rivne: 2001. Volume 8. – S. 93–97.

10. Martynovych T.L. Vpressovka zamknutogo sterzhnia v kryvolyneinoe otverstye izotropnoi plastynky / T.L. Martynovych, M.K. Zvarych // Prykladnaia mehanyka – K., 1974. Volume 10. Part 9. – S. 46–52.

11. Martynovych T.L. O napriazhennom sostoianyy anyzotropnoi plastynky, v kryvolyneinoe otverstvye kotoroj vpressovan zamknutyi sterzhen' / T.L. Martynovych, M.K. Zvarych, V.S. Shhukyn // Mehanyka polymerov. Riga: 1976. Volume 9. – S. 304–309.

12. Siaskyi A.O. Napruzhena posadka zamknenoho pruzhnoho stryzhnia v kryvoliniinyi otvir neskinchennoi izotropnoi plastynky / A.O. Siaskyi, N.V. Shevtsova, O.Yu. Dejneka // Herald of Khmelnytskyi National University. – Khmelnytskyi: 2017. Volume 5. – S. 32–38.

13. Deineka O.Yu. Napruzhena posadka zamknenoho kruhovoho stryzhnia v kruhovyi otvir neskinchennoi izotropnoi plastynky / O.Yu. Dejneka, V.A. Siaskyi // Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. Zbirnyk naukovykh prats. Tekhnichni nauky. Rivne: 2016. Volume 2 (74). – S. 349–356.

14. Deineka O.Yu. Napruzhena posadka zamknenoho kruhovoho stryzhnia v kruhovyi otvir neskinchennoi ortotropnoi plastynky / O.Yu. Dejneka, A.O. Siaskyi // Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. Zbirnyk naukovykh prats. Tekhnichni nauky. Rivne: 2016. Volume 3 (75). – S. 329–337.

15. Siaskyi A. Kontaktna vzaiemodiia rozimknenykh stryzhniv zminnoi zhorstkosti z eliptychnym otvorom neskinchennoi ortotropnoi plastynky / A. Siaskyi, Yu. Batyshkina // Visnyk Ternopilskoho natsionalnoho universytetu. Ternopil: 2004. Volume 9. Part 3. – S. 17–24.

16. Lehnyckyi S.G. Anyzotropnye plastynky / S.G. Lehnyckyi / M.: Gostehizdat. 1957. – 464 s.

17. Shevtsova N. Stress distribution in an infinite pate with partly reinforced elliptical contour / N. Shevtsova, A. Syaskyi // Scientific Journal of the TNTU. Ternopil: 2016. Volume 1 (81). – S. 15–20.

18. Pysarenko H.S. Opir materialiv / H.S. Pysarenko, O.L. Kvitka, E.S Umanskyi. – K.: Vyshcha shkola. 2004. – 655 s.

Рецензія/Peer review : 22.11.2017 р. Надрукована/Printed :09.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Бомба А.Я.

УДК 621.22

І.В. ПЕТКО, М.Й. БОНДАРЕНКО
Київський національний університет технологій та дизайну

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ НИЗЬКОГО ТИСКУ УСТАНОВКИ ДЛЯ ГІДРОРІЗАННЯ

Розглянуто питання можливості визначення зміни тиску в трубопроводах "гідророзподільник – мультиплікатор", запропонована математична модель розрахунку тиску під час процесу гідрорізання.
Ключові слова: гідрорізання, тиск, мультиплікатор, гідроклапан, гідророзподільник.

I.V. PETKO, M.Y. BONDARENKO
Kyiv National University of Technologies and Design

ANALYTICAL STUDY OF THE STATE OF THE LOW PRESSURE HYDRO-CUTTING INSTALLATION DURING HYDRO-DISTRIBUTOR SWITCHING

The purpose of the work is to study the state of the hydraulic system of the plant for the hydraulic cutting of non-metallic materials by a fluid jet, serving as a tool and fed into a cutting zone with supersonic velocity. This method is used to obtain billets in the chemical and light industries, due to its significant advantages over known cutting methods, because it has higher productivity and efficiency and does not require laborious process of manufacturing and resharpening cutters. According to the results of the research, a differential equation describing the pressure variation in the "hydrodistributor-multiplier" pipeline, which takes into account compression of the working fluid at a pressure of 400-500 MPa, is obtained. The resulting differential equation describing the pressure variation in the "hydro distributor-multiplier" pipeline may be useful in designing pipelines of hydrosystems in which the cutting fluid moves with supersonic velocity at the end of the nozzle. According to the results of analytical studies, a differential equation describing the variation of pressure in the hydrodistributor-multiplier pipeline was presented in the article. The scientists considered the calculation scheme of the section of the low pressure system of the hydraulic installation (Fig. 1), consisting of pipelines 2 (pump-hydro distributor) and 4 (hydrodistributor-multiplier), as well as a spray gun distributor of type 3 and a overflow valve 1 which determines working pressure in the system and prevents overload. The authors made a number of assumptions.
Keywords: hydraulic cutting, pressure, multiplier, hydro valve, hydro distributor.

Результати та їх обговорення

Розглянемо розрахункову схему ділянки системи низького тиску гідрорізної установки (рис. 1), що складається з трубопроводів 2 (насос-гідророзподільник) і 4 (гідророзподільник-мультиплікатор), а також гідророзподільника золотникового типу 3 і переливного гідроклапана 1, що визначає робочий тиск в системі і запобігає перевантаженню. Зробимо ряд допущень

Вступ

Під час розробки і дослідження гідравлічного устаткування (зокрема, пристроїв для різання матеріалів високошвидкісним струменем рідини) розроблено ряд математичних моделей, що дозволяють прогнозувати його роботу залежно від різних параметрів (характеристик насосів, гідромультиплікаторів, трубопроводів, робочих рідин та ін.). Так, наприклад, в роботі [1] наведене рівняння динаміки гідроприводу, що дозволяє не тільки визначати його динамічні характеристики, але й вирішувати зворотне завдання – за заданими динамічними характеристиками визначати його конструктивні параметри і режим роботи гідросистеми. Однак ця і подібні їй моделі мало придатні для опису систем, що працюють при високих і надвисоких тисках, якими є гідрорізні установки, оскільки вони не дозволяють оцінити і врахувати вплив процесу стискання робочої рідини і пружних деформацій елементів від дії тиску. Крім того, ці моделі не дають можливості розрахувати початкову фазу циклу, коли тиск в силовому циліндрі ще не досяг величини тиску, при якому починається рух в системі. Отже, залишається невизначеним стан системи в початковий момент руху поршня, що не дає можливості описати наступні фази процесу.

Постановка завдання

Метою роботи є дослідження стану гідросистеми при перемиканні гідророзподільника.

Результати та їх обговорення

Розглянемо розрахункову схему ділянки системи низького тиску гідрорізної установки (рис. 1), що складається з трубопроводів 2 (насос-гідророзподільник) і 4 (гідророзподільник-мультиплікатор), а також гідророзподільника золотникового типу 3 і переливного гідроклапана 1, що визначає робочий тиск в системі і запобігає перевантаженню. Зробимо ряд допущень: в будь-який момент часу виконується умова $p1 \le pкл$, де $p1$ – тиск в трубопроводі 2; $pкл$ – тиск настроювання гідроклапана 1; в початковий момент часу ($\tau = 0$) $p1 = pкл$ і $p_2 = 0$, *де* p_2 *– тиск в трубопроводі 4;* хвильові явища в системі через незначну довжину трубопроводів не враховуємо; витоки робочої рідини відсутні; температура всіх елементів гідросистеми постійна і дорівнює температурі навколишнього середовища; повітря в робочій рідині відсутнє; трубопроводи виготовлені з абсолютно пружного та ізотропного матеріалу; враховуємо деформації тільки трубопроводів; осьові деформації трубопроводів відсутні, оскільки їхні кінці закріплені.

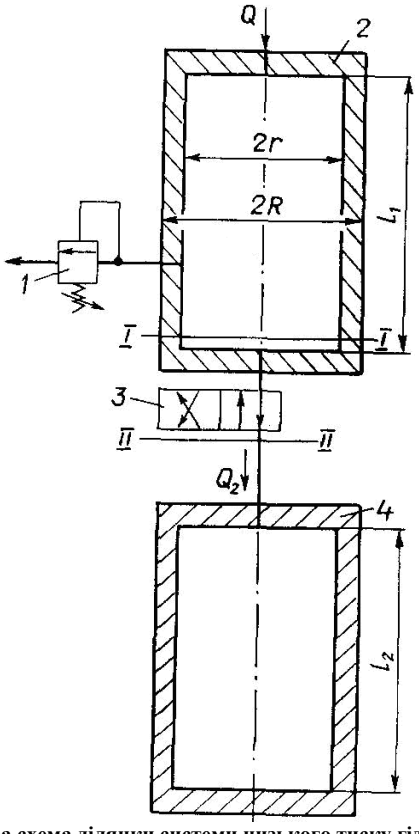


Рис. 1. Розрахункова схема ділянки системи низького тиску гідрорізної установки

Визначимо спочатку швидкість плину рідини через прохідний перетин гідророзподільника з урахуванням її стискання. Для цього порівняємо енергії потоку в перетині I - I, умовно проведеного в каналі вхідного отвору гідророзподільника, і II - II, що збігається з прохідним перетином золотника. Оскільки розглянутий процес не стаціонарний, то рівняння Бернуллі для цього випадку має вигляд

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho_1 g} + \frac{\alpha_1 \upsilon_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho_2 g} + \frac{\alpha_2 \upsilon 2_1^2}{2g} + h_{I-II} + h_i, \quad (1)$$

де z_i, p_i, ρ_i, α_i, υ_i – відповідно геометрична висота положення, тиск, густина рідини, коефіцієнт Коріоліса і швидкість потоку в *i*-у перетині; g = 9,81 м/с2 – прискорення вільного падіння; hI-II – втрати гідродинамічного напору на ділянці між розглянутими перетинами; $h_i = \frac{1}{g}\int_{(l)} \frac{\partial \upsilon}{\partial \tau} dl$ – інерційний напір; l – довжина розглянутої ділянки.

Проінтегрувавши вираз для h_i, одержимо $h_i = \frac{1}{g} \cdot \frac{d\upsilon}{d\tau} l$ (діаметр трубопроводу *2* по довжині не змінюється). Оскільки в перетині *II - II* відбувається раптове звуження потоку, то зміна його (потоку) параметрів, тобто тиску і швидкості, відбувається на дуже короткому відрізку каналу, безпосередньо перед цим перетином. Отже, перетини I - *I і II - II* можна розташувати досить близько один від одного і при цьому l буде досить малою величиною, щоб можна було прийняти інерційний напір $h_i \approx 0$ і надалі його не враховувати, розглядаючи процес як квазістаціонарний.

Оскільки живий перетин I - I в порівнянні з перетином *II - II* – значно більша величина (вікно розподільника тільки почало відкриватися), то і швидкість $\upsilon_2 \gg \upsilon_1$. Тому для нашого випадку приймемо, що $\upsilon_1 \approx 0$. Оскільки втрати по довжині не враховуються, то величина hI-II дорівнює місцевим втратам в гідророзподільнику

$$h_{I-II} = \xi \cdot \frac{\upsilon_2^2}{2g}, \quad (2)$$

де ξ – коефіцієнт місцевих втрат.

Якщо $z_1 = z_2$, то рівняння (1) можна переписати у вигляді

$$\frac{p_1}{\rho_1} = \frac{p_2}{\rho_2} + (\alpha_2 + \xi)\frac{\upsilon_2^2}{2} \quad (3)$$

звідки середня швидкість потоку

$$\upsilon_2 = \varphi\sqrt{2\left(\frac{p_1}{\rho_1} - \frac{p_2}{\rho_2}\right)}, \tag{4}$$

де $\varphi = \dfrac{1}{\sqrt{\alpha_2 + \xi}}$ – коефіцієнт швидкості при плині рідини через прохідний перетин гідророзподільника.

Оскільки в нашому випадку поршень нерухомий, то виходу рідини з трубопроводу *4* не буде і, отже, маса рідини, що перебуває в ньому, буде увесь час зростати, причому в довільний момент часу *τ приріст* маси dm_2 за проміжок dτ становить

$$dm_2 = \rho_2 Q_2 d\tau,$$

де $Q_2 = \varepsilon f \upsilon_2$ – витрати рідини, що надходить в трубопровід *4* через розподільник 3; ε – коефіцієнт стиску потоку в прохідному перетині гідророзподільника; $f = \pi d_з \upsilon_{ср} \tau$ – площа прохідного перетину розподільника в момент часу *τ*; d_3 – діаметр золотника; $\upsilon_{ср}$ p – середня швидкість золотника при перемиканні розподільника.

Використавши формулу (3) і вираз для Q_2 і *f*, одержимо

$$dm_2 = \pi d_3 \upsilon_{ср} \tau \mu \rho_2 \sqrt{2\left(\frac{p_1}{\rho_1} - \frac{p_2}{\rho_2}\right)}\,\mathrm{d}\tau, \tag{5}$$

де $\mu = \varepsilon \varphi$ – коефіцієнт витрат.

З іншого боку dm_2 можна визначити, якщо відомо залежність $m_2 = m_2(p)$. Знайдемо цю залежність.

Дія внутрішнього тиску p_2 на стінки трубопроводу *4* приводить до їхнього переміщення на величину *u,* що визначається зі співвідношення [2]

$$u = \frac{1-\nu}{E} \cdot \frac{p_2 r^3}{R^2 - r^2} + \frac{1+\nu}{E} \cdot \frac{p_2 r R^2}{R^2 - r^2}, \tag{6}$$

де *r* і *R* – відповідно внутрішній і зовнішній діаметри трубопроводу при $p2 = 0$; *E* і ν – модуль пружності і коефіцієнт Пуассона матеріалу трубопроводу.

Позначивши через $k = R/r$ – коефіцієнт товстостінності і перетворивши вираз (6), одержимо

$$u = p2\, r\, A, \tag{7}$$

де $$A = \frac{1 - \nu + k^2(1-\nu)}{E(k^2 - 1)}.$$

Отже, об'єм порожнини трубопроводу *4* при тиску p_2

$$V_2 = \pi (r+u)^2 l_2 = V_{20}(1 + A p_2)^2, \tag{8}$$

де $V_{20} = \pi r^2 l$ – об'єм порожнини при $p_2 = 0$; l_2 – довжина трубопроводу *4*.

Помноживши праву і ліву частини виразу (8) на густину p_2, знайдемо масу рідини в трубопроводі *4*

$$m_2 = \rho_2 V_{20} (1 + A p_2)^2. \tag{9}$$

Продиференціювавши вираз (9), одержимо

$$dm_2 = V_{20}(1 + A p_2)\left[\frac{d\rho_2}{dp_2}(1 + A p_2) + 2\rho_2 A\right] dp_2. \tag{10}$$

З виразу для коефіцієнта стискання рідини *β*

$$\beta = \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{d\rho}{dp} \tag{11}$$

(ρ_o – густина рідини при тиску $p = 0$) визначимо приріст густини $d\rho$ при зміні тиску на *dp*

$$d\rho = \beta \rho_o dp. \tag{12}$$

Вважаючи, що $\beta = \text{const}$, після інтегрування виразу (12) одержимо

$$\rho = \rho_o (1 + \beta p). \tag{13}$$

Підставивши вирази (12) і (13) в (10), знайдемо

$$dm_2 = \rho_o V_{20}(1 + A p_2)\left[\beta(1 + A p_2) + 2A(1 + \beta\rho_2)\right] dp_2. \tag{14}$$

Підставивши вираз (13) в (5) і прирівнявши праві частини формул (5) і (14), маємо

$$\frac{dp_2}{d\tau} = \frac{1}{V_{20}} \pi d_3 \upsilon_{ср} \mu \tau (1 + \beta\rho_2) \sqrt{\frac{2}{\rho_o}\left(\frac{p_1}{1 + \beta\rho_1} - \frac{p_2}{1 + \beta\rho_2}\right)} \Big/ \tag{15}$$

$$\left\{(1 + A p_2)\left[\beta(1 + A p_2) + 2A(1 + \beta\rho_2)\right]\right\}.$$

Отримане диференціальне рівняння (15) описує зміну тиску в трубопроводі *4* при перемиканні гідророзподільника. В загальному випадку, коли $p1 - p1\ (\tau)$ і вид цієї залежності не встановлений, для

знаходження $p_2 = p_2(\tau)$ одного рівняння (15) недостатньо. Однак можливий окремий випадок, коли продуктивність насоса Q така, що в будь-який момент часу виконується умова $Q \geq Q_2$ і, отже, процес протікає при постійному тиску p1, що дорівнює тиску настроювання переливного клапана $p_{кл}$. Тоді рівняння (15) буде розв'язуваним щодо однієї невідомої p_2.

В таблиці 1 наведені результати розрахунку тиску в трубопроводі *4* з врахуванням $(p_2(\tau))$ і без врахування $(p_2^*(\tau))$ пружних деформацій трубопроводу при наступних параметрах системи: r = 5,5 мм; R = 8 мм; l_2 = 0,7 м; E = 2·105 МПа; v = 0,3; $p_{кл}$ = 10 МПа; $d3$ = 16 мм; υср = 80 мм/с; μ = 0,6; ρ_o = 890 кг/м3; β = 6·10-4 1/МПа.

Таблиця 1

Результати розрахунку тиску в трубопроводі 4

$\tau\ 10^4$, с	Тиск, МПа		$\tau\ 10^4$, с	Тиск, МПа	
	p_2	p_2^*		p_2	p_2^*
0	*0*	*0*	*4*	*0,6755*	*0,7096*
1	*0,0429*	*0,0451*	*4,77*	-	*1,0000*
2	*0,1711*	*0,1799*	*4,89*	*1,0000*	-
3	*0,3829*	*0,4024*			

Аналіз результатів розрахунку показує, що тиск p_2^* росте трохи швидше, ніж p_2, однак різниця становить близько 5 %. Якщо особливо висока точність розрахунків не потрібна, то можна прийняти $p2 \approx p_2^*$ і деформацію не враховувати. Тоді рівняння (15) набуде більш простого вигляду

$$\frac{dp_2}{d\tau} = \frac{1}{\beta V_{20}} \pi d_3 \upsilon_{ср} \mu \tau (1+\beta\rho_2) \sqrt{\frac{2}{\rho_o}\left(\frac{p_1}{1+\beta\rho_1} - \frac{p_2}{1+\beta\rho_2}\right)}. \quad (16)$$

Проінтегрувавши вираз (16) і виконавши деякі перетворення, можемо визначити час Δτ, за який тиск в трубопроводі *4* виросте від 0 до $p_{ст}$ (де $p_{ст}$ – тиск, при якому починається рух поршня мультиплікатора), або, інакше кажучи, час, що пройде з моменту відкриття прохідного перетину гідророзподільника до початку руху поршня, тобто швидкодія гідросистеми

$$\Delta\tau = \frac{V_{20}\sqrt{2\beta\rho_o(1+\beta p_{кл})}}{\pi d_3 \upsilon_{ср} \mu} arctg \frac{\sqrt{\beta p_{кл}(1+\beta p_{ст})} - \sqrt{\beta(p_{кл} - p_{ст})}}{\beta\sqrt{p_{кл}(p_{кл} - p_{ст}) + \sqrt{(1+\beta p_{ст})}}} \quad (17)$$

Помноживши Δτ на середню швидкість переміщення золотника υср, одержимо x = υср Δτ – відкриття вікна золотника в момент, коли поршень почне рухатись. Величина x, а також значення тисків $p_1 = p_{кл}$ і $p_2 = p_{ст}$ визначають початкові умови, що необхідні для розрахунку стану системи під час наступної фази роботи установки – при переміщенні поршня мультиплікатора.

Висновки

За результатами аналітичних досліджень отримано диференціальне рівняння, що описує зміну тиску в трубопроводі гідророзподільник-мультиплікатор.

Література

1. Гидроприводы и гидропневмоавтоматика станков / **[В. А. Федорец, М. Н. Педченко, А. Ф. Пичко и др.]. – К. : Выща школа, 1987. – 375 с.**

2. Саленко О. Ф. Гідро- та гідроабразивна обробка: теорія, технологія та обладнання : навч. посібник. / О. Ф. Саленко, І. В. Петко, О. В. Третьяков. – Київ : ВІПОЛ, 1999. – 450 с.

3. Дослідження впливу конструктивних параметрів устаткування на продуктивність гідроабразивного розрізання / Ю. В. Клапцов, І. В. Петко, І. В. Панасюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. – № 1. – С. 25–28.

References

1. Hydraulic drives and hydropneumatic automation of machine tools / [V. A. Fedorets, M. N. Pedchenko, A. F. Pichko, etc.]. – K.: High School, 1987. –375 p.

2. Salenko O. F. Hydro and Hydroabrasive Processing: Theory, Technology and Equipment: Teaching. manual. / O. F. Salenko, I. V. Petko, O. V. Tretyakov. – Kyiv: VIPOL, 1999. – 450 p.

3. Investigation of the influence of the structural parameters of the equipment on the performance of hydroabrasive cutting / Yu. V. Klaptsov, I. V. Petko, I. V. Panasyuk // Bulletin of the Khmelnitsky National University – 2007. – No. 1. – S. 25–28.

Рецензія/Peer review : 14.11.2017 р. Надрукована/Printed :19.11.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Петко І.В.

УДК 677.055

С.А. ПЛЕШКО, Ю.А. КОВАЛЬОВ
Київський національний університет технологій та дизайну

ВПЛИВ ЗМАЩЕННЯ ПАР ТЕРТЯ МЕХАНІЗМУ В'ЯЗАННЯ В'ЯЗАЛЬНИХ МАШИН НА ДОВГОВІЧНІСТЬ РОБОТИ КЛИНІВ

Механізм в'язання відноситься до основного механізму в'язальних машин. Ефективність його роботи залежить від динамічних навантажень, що виникають в результаті ударної взаємодії голок з клинами. Як показують дослідження, взаємодія робочих органів механізму в'язання призводить до динамічних навантажень пари голка-клин і, як наслідок, до зниження працездатності в'язальних машин та погіршення якості трикотажного полотна. Враховуючи вищесказане, актуальним питанням легкого машинобудування є вирішення проблеми аналізу впливу змащення пар тертя механізму в'язання на зниження динамічних навантажень пари голка-клин, що негативно впливає на довговічність роботи клинів. В результаті виконаних досліджень встановлено, що одним із ефективних шляхів зниження динамічних навантажень механізму в'язання є удосконалення процесу змащення пари голка-клин. Результати досліджень можуть бути використані при розробці нових моделей в'язаних машин та удосконалення існуючих їх конструкцій.

Ключові слова: механізм в'язання, в'язальна машина, змащення пар тертя механізму в'язання, динамічні навантаження механізму в'язання, динаміка взаємодії голки з клином, зниження динамічних навантажень пари голка-клин.

S.F. PLESHKO, Y.F. KOVALEV
Kyiv National University of Technology and Design

INFLUENCE OF LUBRICATION OF FRICTION PAIRS OF THE KNITTING MACHINE KNITTING MECHANISM ON THE DURABILITY OF THE WEDGE WORK

The knitting mechanism refers to the basic mechanism of knitting machines. The effectiveness of its operation depends on the dynamic loads that arise as a result of impact interaction of needles with wedges. As studies show, the interaction of the working mechanisms of the knitting mechanism leads to dynamic loads of the needle-wedge pair and, as a consequence, to a decrease in the performance of knitting machines and a deterioration in the quality of the knitted fabric. In view of the foregoing, the current issue of light engineering is the solution of the problem of analyzing the effect of lubrication of friction pairs on the knitting mechanism on reducing the dynamic loads of the needle-wedge pair, which adversely affects the durability of the wedge work. As a result of the performed studies, it has been established that one of the effective ways to reduce the dynamic loads of the knitting mechanism is to improve the process of lubrication of the needle-wedge pair. The results of research can be used in the development of new models of knitting machines and the improvement of their existing designs.

Keywords: knitting mechanism, knitting machine, lubrication of friction pairs of the knitting mechanism, dynamic loads of the knitting mechanism, dynamics of the needle-wedge interaction, reduction of the dynamic loads of the needle-wedge pair.

Підвищення ефективності роботи в'язальних машин, як відомо [1–3], можливо досягти зниженням втрат на тертя робочих органів механізму в'язання (в основному пари тертя голка-клин). Тому задачею даних досліджень є аналіз впливу змащення [4], з метою зниження втрат тертя робочих органів в'язальної машини, на зношення робочих поверхонь клинів та на їх довговічність.

Об'єктом досліджень обрано процес змащення пар тертя механізму в'язання в'язальних машин та аналіз його ефективності на підвищення довговічності роботи клинів. При вирішенні поставлених задач були використані сучасні методи теорії проектування машин легкої промисловості та теорій тертя і опору матеріалів.

Постановка завдання. Враховуючи актуальність питання підвищення ефективності роботи в'язальних машин шляхом підвищення довговічності роботи клинів механізму в'язання, стаття присвячена аналізу впливу змащення на зниження тертя робочих органів в'язальних машин з метою зниження зношення робочих поверхонь клинів та підвищення довговічності їх роботи..

Результати та їх обговорення. Використовуючи результати досліджень [3, 5], довговічність роботи клинів в'язальних машин може бути визначена із умови:

$$T = \frac{H_{max} r_{np}^{0,5\beta t}}{60\, n\, z\, K\, f^t q^{1+0,5\beta t}} = \frac{H_{max} r_{np}^{a}}{N\, K\, f^t q^b}, \qquad (1)$$

де T – термін служби клина в годинах (довговічність);

H_{max} – гранично допустиме зношення клина, що вимірюється по нормалі до його робочої поверхні;

r_{np} - приведений радіус кривизни пари п'ятка голки-клин (надалі голка-клин);

a - показник степені,

$$a = 0,5\beta t; \qquad (2)$$

β - коефіцієнт, що враховує характеристику поверхонь пари голка-клин,

$$\beta = \frac{1}{1+2\nu}; \tag{3}$$

ν - коефіцієнт кривої опорної поверхні клина;

t - показник степені кривої контактної утоми пари голка-клин;

N - число циклів навантаження пари тертя на протязі однієї години роботи,

$$N = 60nz = \frac{360Vz}{\pi d}; \tag{4}$$

n - частота обертання голкового циліндра машини (для круглов'язальної машини);

z - кількість голок в голковому циліндрі;

V - лінійна швидкість голкового циліндра;

d - діаметр голкового циліндра;

K - параметр, що характеризує властивості матеріалів пари тертя,

$$K = 2K_0\left(\frac{4\eta}{\pi}\right)^{0,5}\cdot 0{,}418^c\, E^{0,5c}\,\frac{c}{c+0,5};\; K_0 = C_1\left(\frac{1-\mu_1^2}{E}\right)^{c-t}\left(\frac{K_1}{C_2\sigma_0}\right)^t;\; \eta = \frac{1-\mu_1}{E_1}+\frac{1-\mu_2}{E_2} = \frac{2(1-\mu)}{E}; \tag{5}$$

μ_1, μ_2 - коефіцієнти Пуассона матеріалів голки та клина відповідно, $\mu_1 = \mu_2 = \mu$;

E_1, E_2 - модулі пружності матеріалів голки та клина відповідно;

E - приведений модуль пружності матеріалів голки та клина, $E = E_1 = E_2$;

c - показник ступені,

$$c = 1+\beta t; \tag{6}$$

$$C_1 = \frac{1{,}2\nu^{0,5}}{K_2(1+\nu)}; \tag{7}$$

K_2 - коефіцієнт, що вибирається в залежності від параметра ν;

K_1 - коефіцієнт пропорційності між питомою силою тертя та напруженням в парі тертя;

$$C_2 = \left(\frac{b_1}{2}\right)^{\beta}\left(\frac{2{,}35}{K_2}\right)^{1-\beta}\left(\frac{r}{h_{max}}\right)^{0,5(1-\beta)}; \tag{8}$$

b_1 - коефіцієнт кривої опорної поверхні;

r - середній радіус вершин і виступів мікронерівностей поверхонь тертя, $r = \sqrt{R_1 R_2}$;

R_1, R_2 - радіуси кривизни мікронерівностей поверхонь тертя в поперечному та поздовжньому напрямках обробки поверхонь;

h_{max} - максимальна висота мікронерівностей поверхні клина;

σ_0 - межа міцності при однократному напруженні пари голка-клин;

f - коефіцієнт тертя пари голка-клин;

q - питомий нормальний тиск в зоні контакту голки з клином, $q = \frac{F_{max}}{l\sin\alpha}$;

F_{max} - максимальна сила удару голки об клин (горизонтальна складова);

l - ширина ділянки контакту голки з клином;

α - кут зустрічі голки з клином в момент удару;

b - показник ступені, $b = 1+0{,}5\beta t$.

Оскільки метою досліджень є аналіз впливу тертя пари голка-клин на довговічність клину, рівняння (1) перетворюємо в наступний, зручний для аналізу, вид:

$$T = \frac{A}{f^t F_{max}^b}, \tag{9}$$

де

$$A = \frac{H_{max} r_{np}^a (l\sin\alpha)^b}{NK}. \tag{10}$$

Проаналізуємо вплив тертя на довговічність, як приклад, кулірного клина круглов'язальної машини КО-2.

Враховуючи конструктивні особливості машини [6] та результати досліджень [2, 3, 5], в якості вихідних даних приймаємо: діаметр голкового циліндру машини $d = 450$ мм; лінійна швидкість голкового циліндра $V = 1{,}0$ м/с; кількість голок в циліндрі $z = 1224$; матеріал голки сталь У7А, твердість HRC 68…70; матеріал клина сталь ШХ 15, твердість HRC 62…65; ширина ділянки контакту голки з клином $l = 2{,}5\cdot 10^{-3}$ м;

кут зустрічі голки з клином в момент удару $\alpha = 56^0$; модулі пружності та коефіцієнти Пуассона матеріалів голки і клина $E_1 = E_2 = E = 1{,}96 \cdot 10^{11}$ Н/м^2; $\mu_1 = \mu_2 = \mu = 0{,}29$; гранично допустиме зношення клина $H_{max} = 0{,}6 \cdot 10^{-3}$ м; коефіцієнти кривої опорної поверхні $\nu = 3$, $b_1 = 5$; радіуси кривизни мікронерівностей поверхонь тертя $R_1 = 16$ мкм, $R_2 = 11300$ мкм; максимальна висота мікронерівностей поверхні клина $h_{max} = 3{,}2$ мкм; межа міцності при однократному напруженні пари голка-клин $\sigma_0 = 7 \cdot 10^8$ Н/м^2; коефіцієнти $t = 3$, $K_1 = 2$, $K_2 = 0{,}69$.

Використовуючи вихідні дані та приведені вище залежності, знаходимо; $a = 0{,}2145$; $b = 1{,}2145$; $c = 1{,}429$; $\beta = 0{,}143$; $N = 3{,}117 \cdot 10^6$ цикл/год.; $\eta = 0{,}724 \cdot 10^{-11}$; $C_1 = 0{,}753$; $C_2 = 26{,}5$; $r = 425{,}2$ мкм; $K_0 = 595{,}4 \cdot 10^{-15}$; $K = 0{,}898 \cdot 10^{-10}$; $q = 4{,}395 \cdot 10^4$ Н/м; $q^b = 43{,}544 \cdot 10^4$; $r_{np}^a = 99{,}8 \cdot 10^5$; $A = 11781$.

Враховуючи вище приведене, рівняння (9) приймає вид:

$$T = \frac{11781}{F_{max}^{1{,}2145} f^3} \text{ год.} \tag{11}$$

Підставляючи в рівняння (11) величини коефіцієнта тертя пари голка-клин f та максимальної сили удару голки об клин F_{max}, що відповідає даному значенню f [3, 5], за допомогою розробленої програми знаходимо необхідну довговічність роботи кулірних клинів круглов'язальної машини КО-2 (результати представлені в табл. і на рис. 1 – крива 1).

Вплив тертя (змащення) на величину зношення клинів можна оцінити перетворюючи рівняння (1) в зручний для цього вид:

$$H = \frac{TNKf^t F_{max}^b}{r_{np}^a (l \sin\alpha)^b} = Bf^t F_{max}^b, \tag{12}$$

де

$$B = \frac{TNK}{r_{np}^a (l \sin\alpha)^b}. \tag{13}$$

Прийнявши $T = 10 \cdot 10^3$ год., одержуємо $B = 0{,}51 \cdot 10^{-3}$. Тоді рівняння (12) приймає вид:

$$H = 0{,}51 \cdot 10^{-3} F_{max}^{1{,}2145} f^3, \text{ м } = 510 F_{max}^{1{,}2145} f^3 \text{ мкм.} \tag{14}$$

Таблиця

Результати розрахунків впливу тертя (змащення) на довговічність кулірних клинів круглов'язальної машини КО-2 та на їх зношення (при $T = 10 \cdot 10^3$ год.)

Коефіцієнт тертя пари голка-клин f	Кут тертя пари голка-клин ρ, град	Максимальна сила удару голки об клин F_{max}, Н	Довговічність роботи клина T, 10^3 год.	Величина зношення клина H, мкм при $T = 10 \cdot 10^3$ год.
0,0524	3,0	45,753	788,15	7,62
0,0611	3,5	47,055	480,48	12,50
0,0699	4,0	48,469	309,56	19,41
0,0787	4,5	50,013	208,79	28,77
0,0875	5,0	51,708	145,89	41,18
0,0963	5,5	53,581	104,81	57,32
0,1051	6,0	55,666	76,97	78,05
0,1139	6,5	58,008	57,52	104,45
0,1228	7,0	60,663	43,47	138,20
0,1316	7,5	63,711	33,28	180,53
0,1405	8,0	67,260	25,60	234,64
0,1494	8,5	71,464	19,78	303,67
0,1584	9,0	76,556	15,27	393,48
0,1673	9,5	82,901	11,76	510,68
0,1763	10,0	91,115	8,96	670,27
0,1853	10,5	102,346	6,70	896,25
0,1944	11,0	119,045	4,83	1243,39
0,2034	11,5	147,822	3,24	1852,55
0,2125	12,0	217,434	1,78	3375,44

Підставляючи в рівняння (14) F_{max} та f (табл.) за допомогою розробленої програми знаходимо необхідну величину зношення робочої поверхні кулірних клинів круглов'язальної машини КО-2 при $T = 10 \cdot 10^3$ год. Одержані результати представлені в табл. і на рис. 1 – крива 2.

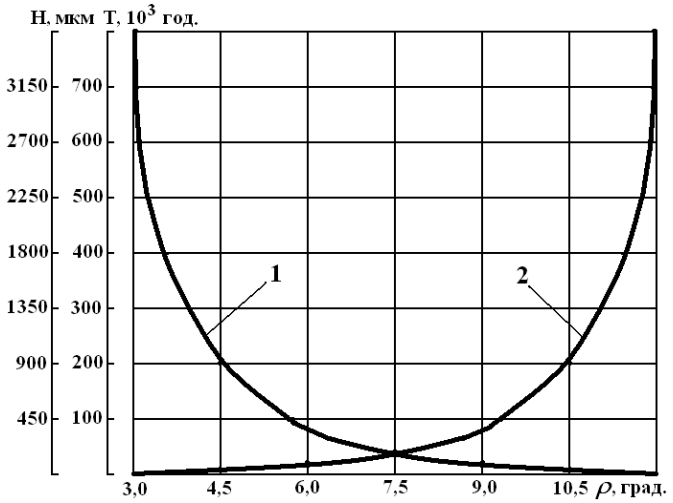


Рис. 1. Вплив тертя (змащення) на довговічність кулірних клинів круглов'язальної машини КО-2 (крива 1) та на зношення їх робочої поверхні при $T = 10 \cdot 10^3$ год. (крива 2)

Висновки. Аналіз одержаних результатів показує що ефективність змащення (тертя) робочих органів суттєво впливає на зношення клинів в'язальних машин і, відповідно, на довговічність їх роботи.

Раціональним режимом роботи круглов'язальних машин типу КО є такий режим, коли коефіцієнт тертя пари голка-клин знаходиться в межах 0,08…0,1 (може бути досягнуто вибором відповідного виду мастила та режимів змащення механізму в'язання). При цьому довговічність кулірного клина коливається в межах від $208{,}79 \cdot 10^3$ до $76{,}97 \cdot 10^3$ год. (від 16312 до 6013 днів при 2-змінній роботі машини).

При існуючому режимі роботи круглов'язальної машини КО-2, як показують дослідження [2], довговічність кулірних клинів не перевищує $9 \cdot 10^3$ год. (703 днів).

Література

1. Хомяк О.Н. Повышение эффективности работы вязальных машин / Б.Ф. Піпа. – М. : Легпромбытиздат, 1990. – 208 с.

2. Піпа Б.Ф. Динаміка круглов'язальних машин / О.М. Хомяк, Г.І. Павленко. – К. : КНУТД, 2005. – 294 с.

3. Піпа Б.Ф. Динаміка механізмів в'язання круглов'язальних машин / Піпа Б.Ф. – К. : КНУТД, 2008. – 416 с.

4. Чабан В.В. Влияние смазки и металлоплакирующих нанотехнологий на повышение эффективности работы механизмов вязания вязальных машин / В.В. Чабан, Б.Ф. Пипа, А.К. Прокопенко. – К. : КНУТД, 2014. – 176 с.

5. Піпа Б.Ф. Удосконалення робочих органів механізмів в'язання круглов'язальних машин / С.А. Плешко. – К. : КНУТД, 2012. – 470 с.

6. Машины кругловязальные типа КО-2. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Черновцы, 1992. – 86 с.

References

1. Khomiak O.N. Povyshenie effektivnosti raboty viazalnyh mashin / B.F. Pipa. – M. : Lehprombytizdat, 1990. – 208 s.

2. Pipa B.F. Dynamika kruhloviazalnykh mashyn / O.M. Khomiak, H.I. Pavlenko. – K. : KNUTD, 2005. – 294 s.

3. Pipa B.F. Dynamika mekhanizmiv viazannia kruhloviazalnykh mashyn / Pipa B.F. – K. : KNUTD, 2008. – 416 s.

4. Chaban V.V. Vliianye smazki i metalloplakyruiushchykh nanotekhnolohyi na povyshenye effektivnosti raboty mekhanizmov viazaniia viazalnykh mashyn / V.V. Chaban, B.F. Pypa, A.K. Prokopenko. – K. : KNUTD, 2014. – 176 s.

5. Pipa B.F. Udoskonalennia robochykh orhaniv mekhanizmiv viazannia kruhloviazalnykh mashyn / S.A. Pleshko. – K. : KNUTD, 2012. – 470 s.

6. Mashyny kruhloviazalnye typa KO-2. Tekhnicheskoe opisanie i instruktsiia po ekspluatatsii. – Chernovtsy, 1992. – 86 s.

Рецензія/Peer review : 17.11.2017 р. Надрукована/Printed :10.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Місяць В.П.

УДК 685.31

В.Ю. ЩЕРБАНЬ, Н.І. МУРЗА, А.М. КИРИЧЕНКО, М.І. ШОЛУДЬКО
Київський національний університет технологій та дизайну

ВИЗНАЧЕННЯ ПРИВЕДЕНОГО КОЕФІЦІЄНТУ ТЕРТЯ ДЛЯ КІЛЬЦЕВИХ ТА ТРУБЧАТИХ СПРЯМОВУВАЧІВ НИТКИ ТРИКОТАЖНИХ МАШИН

В роботі наведені результати досліджень з визначення приведеного коефіцієнту тертя нитки при її взаємодії з поверхнями кільцевих та трубчатих спрямовувачів круглов'язальних трикотажних машин. Отримані аналітичні залежності у вигляді трансцендентних рівнянь для визначення кута радіального охоплення нитки поверхнею спрямовувача нитки. Для визначення кута охоплення використовувався алгоритм дихотомії та спеціально розроблена програма.

Ключові слова: нитка, кільцевий спрямовувач, трубчатий спрямовувач, коефіцієнт тертя.

V.YU. SCHERBAN, N.I. MURZA, A.N. KIRICHENKO, M.I. SHOLUDKO
Kyiv National University of Technologies and Design

DETERMINATION OF FRICTION COEFFICIENT FACTOR FOR RINGS AND TUBULAR TRAILERS OF THREAD OF KNITTED MACHINES

The imperfection of the design of the ring and tubular yarn guides does not allow minimizing the tension during operation of the knitting machine. The peculiarities of the process of thread interaction with the guiding and working organs of knitted machines, when there is a radial engagement with the surface of the guiding element of the thread, leads to an additional increase in its tension up to 30%, which causes breakages. This negatively affects the performance of equipment and the quality of the products being vented. The solution of this problem is of great importance for the improvement of the technological processes of the knitting industry from the viewpoint of increasing the productivity of technological equipment and the quality of the products being let out. Thus, the topic of this article is relevant, which is important for improving the design of existing ring and tube guides and developing new ones. Objects and methods of research. Ring and tubular guides are an integral part of the thread supply system of the technological equipment of the knitting industry. The imperfection of the design of annular and tubular guides does not allow minimizing the tension of the thread during the operation of the technological equipment and leads to a violation of the technological regime. First of all, this affects the features of the process of interaction of the yarn with the guide taking into account the radial coverage of its surface, which is predetermined by the structure and material, the specificity of the filament manufacturing, the length of the individual filaments and their mutual relative relative position, as well as the unevenness of the input tension. Theoretical basis for solving scientific and technical problems are the works of leading scientists in the branches of technology of textile and knitted productions, textile materials science, thread mechanics, elasticity theory, mathematical modeling. In theoretical studies, methods of the theory of algorithms, analytical geometry, experimental planning, and statistical processing of research results were used. When developing software, modern languages of object - oriented programming were used. Practical significance. The improvement of the design of the ring and tube guides of the yarn of knitted machines makes it possible to minimize their tension, reduce the breakage of the yarn, it is important for improving the technological processes of the knitting and garment industry from the viewpoint of increasing the productivity of the technological equipment and the quality of the products being let out.

Keywords: thread, annular guide, tube guide, coefficient of friction.

Вступ

Актуальність. Недосконаліть конструкції кільцевих та трубчастих спрямовувачів нитки не дозволяє здійснювати мінімізацію натягу в процесі роботи трикотажної машини [1]. Особливості процесу взаємодії нитки з направляючими та робочими органами трикотажних машин, коли має місце радіальне охоплення поверхнею напрямного елементу нитки, призводить до додаткового зростання її натягу до 30%, що визиває обриви [1–3]. Це негативно впливає на продуктивність устаткування та якість готової продукції. Розв'язання цієї задачі має важливе значення для удосконалення технологічних процесів трикотажної промисловості з позиції підвищення продуктивності технологічного устаткування та якості готової продукції [3–7]. Таким чином, тема даної статті є актуальною, яка має важливе значення для удосконалення конструкції існуючих кільцевих та трубчастих спрямовувачів та розробки нових [1, 8–12].

Об'єкти і методи дослідження. Кільцеві та трубчасті спрямовувачі є складовою частиною системи подачі нитки технологічного устаткування трикотажної промисловості. Недосконаліть конструкції кільцевих та трубчастих спрямовувачів не дозволяє здійснювати мінімізацію натягу нитки в процесі роботи технологічного устаткування і призводить до порушення технологічного режиму [1, 2]. В першу чергу, на це впливає особливості процесу взаємодії нитки з напрямною з урахуванням радіального охвату її поверхні, що зумовлено структурою і матеріалом, специфікою виготовлення нитки, довжиною окремих елементарних волокон та їх взаємним розташуванням відносно один до одного, а також нерівномірність вхідного натягу [2, 3–6]. Теоретичною основою при вирішенні науково-технічної проблеми є праці провідних вчених в галузях технології текстильного та трикотажного виробництв, текстильного матеріалознавства, механіки нитки, теорії пружності, математичного моделювання. У теоретичних дослідженнях використано методи теорії алгоритмів, аналітичної геометрії, планування експерименту та статистичної обробки результатів досліджень. При розробці програмного забезпечення використовувалися сучасні мови об'єктно – орієнтованого програмування [1, 3].

Практичне значення. Удосконалення конструкції кільцевих та трубчастих спрямовувачів нитки трикотажних машин дозволяє мінімізувати їх натяг, зменшити обриви нитки, що має важливе значення для удосконалення технологічних процесів трикотажної та швейної промисловості з позиції підвищення продуктивності технологічного устаткування та якості готової продукції [1].

Постановка завдання

Розробити математичні моделі для визначення приведеного коефіцієнту тертя при взаємодії нитки з кільцевими та трубчастими спрямовувачами нитки трикотажних машин з урахуванням їх реальних фізико – механічних властивостей, структури та умов переробки на технологічному обладнанні.

Розробити алгоритм методу дихотомії при розв'язанні трансцендентних рівнянь та програмне забезпечення для визначення висоти сегменту заповненого матеріалом нитки, радіального кута охвату поверхні нитки напрямною поверхнею та приведеного коефіцієнту тертя.

Встановити залежності приведеного коефіцієнту тертя від співвідношення внутрішнього радіусу кільцевих та трубчастих спрямовувачів та розрахункового радіусі поперечного перетину нитки для оптимізації геометричні параметри робочих органів системи подачі ниток на трикотажному обладнанні з позиції мінімізації натягу в робочій зоні.

Основна частина

Приведений коефіцієнт тертя, при взаємодії нитки з поверхнею кільцевих та трубчастих спрямовувачів, коли має місце радіальне охоплення поверхні нитки напрямною визначається за формулою [1–3, 13]

$$f = 4\frac{\sin(\frac{\delta}{2})}{\delta + \sin(\delta)} f_0, \tag{1}$$

де f – приведений коефіцієнт тертя; δ – радіальний кут охоплення поверхні нитки направляючою; f_0 – коефіцієнт тертя нитки по направляючій поверхні при відсутності радіального охоплення.

На рис.1 показана загальна розрахункова схема. При вирішенні цього питання, для комплексних ниток та пряжі, можна рахувати, що при взаємодією з внутрішньою поверхнею кільцевих та трубчастих спрямовувачів окремі елементарні волокна будуть займати таке положення, при якому їх натяг буде мати мінімальне значення [1, 3, 8–12]. У цьому випадку можна рахувати, що перетин комплексної нитки чи пряжі деформується і прийме форму сегмента.

Площа сегмента буде визначатися за формулою

$$S_C = R^2 \arccos(\frac{R-h}{R}) - (R-h)\sqrt{2Rh-h^2}\ , \tag{2}$$

де S_C – площа сегмента; R – внутрішній радіус кільцевих та трубчастих спрямовувачів; h – висота сегмента.

Площа сегмента буде визначатися за формулою

$$S_C = \pi r_H^2\ , \tag{3}$$

де r_H – радіус поперечного перетину нитки.

З урахуванням рівняння (3) рівняння (2) буде мати вигляд

$$\pi r_H^2 = R^2 \arccos(\frac{R-h}{R}) - (R-h)\sqrt{2Rh-h^2}\ . \tag{4}$$

Рівняння (4) представляє собою трансцендентне рівняння відносно h. Для його вирішення необхідно використовувати чисельні методи. Нами був обраний метод дихотомії.

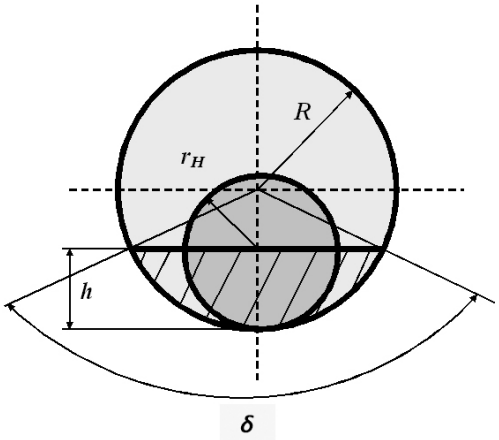


Рис. 1. Загальна розрахункова схема

Цільова функція буде мати вигляд

$$g = \pi r_H^2 - R^2 \arccos(\frac{R-h}{R}) - (R-h)\sqrt{2Rh-h^2}\ , \qquad (5)$$

де g – значення цільової функції.

Перейдемо до розгляду методу ділення відрізку $[h_i, h_{i+1}]$ навпіл (метод дихотомії). Суть методу полягає в побудові ітераційної послідовності вкладених один в одного відрізків $[h_{in}, h_{i+1n}]$, кінці яких представляють монотонні послідовності $\{h_{in}\}, \{h_{i+1n}\}$, причому

$$x_i = \frac{h_i + h_{i+1}}{2},\ g_i = \pi r_H^2 - R^2 \arccos(\frac{R-x_i}{R}) - (R-x_i)\sqrt{2Rh-h^2}\rangle 0,\ h_{in} \le \xi,\ h_{i+1n} \ge \xi,\quad n = 1,2....$$

де ξ – корінь трансцендентного рівняння (5) на відрізку $[h_i, h_{i+1}]$.

Збіжність даного методу повільна. Проте при будь-якій ширині відрізання $[h_i, h_{i+1}]$ збіжність гарантована. Для реалізації алгоритму методу дихотомії була розроблена спеціальна програма на мові Object Pascal в середовищі Delphi. На рис. 2 представлені форма програми з результатами визначення висоти сегменту та форма програми для визначення приведеного коефіцієнту тертя для різного виду ниток. Величина радіальний кут охоплення поверхні нитки направляючою буде визначатися за формулою

$$\delta = 2\arccos(\frac{R-h}{R})\ . \qquad (6)$$

Результати розрахунків за формулами (1) , (5), (6) представлені в таблицях 1, 2 та на рис. 3.

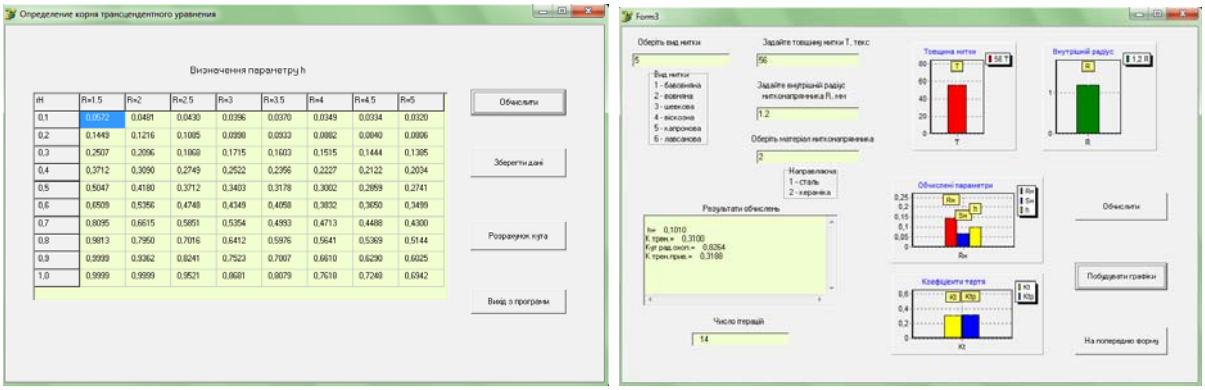


Рис. 2. Форми програми

Таблиця 1

Результати визначення висоти h сегмента заповненого матеріалом нитки

rH	R=1.5	R=2	R=2.5	R=3	R=3.5	R=4	R=4.5	R=5
0,1	0,0572	0,0481	0,0430	0,0396	0,0370	0,0349	0,0334	0,0320
0,2	0,1449	0,1216	0,1085	0,0998	0,0933	0,0882	0,0840	0,0806
0,3	0,2507	0,2096	0,1868	0,1715	0,1603	0,1515	0,1444	0,1385
0,4	0,3712	0,3090	0,2749	0,2522	0,2356	0,2227	0,2122	0,2034
0,5	0,5047	0,4180	0,3712	0,3403	0,3178	0,3002	0,2859	0,2741
0,6	0,6509	0,5356	0,4748	0,4349	0,4058	0,3832	0,3650	0,3499
0,7	0,8095	0,6615	0,5851	0,5354	0,4993	0,4713	0,4488	0,4300
0,8	0,9813	0,7950	0,7016	0,6412	0,5976	0,5641	0,5369	0,5144
0,9	0,9999	0,9362	0,8241	0,7523	0,7007	0,6610	0,6290	0,6025
1,0	0,9999	0,9999	0,9521	0,8681	0,8079	0,7618	0,7248	0,6942

Таблиця 2

Значення приведеного коефіцієнту тертя

rH	R=1.5	R=2	R=2.5	R=3	R=3.5	R=4	R=4.5	R=5
0,1	0,5643	0,4025	0,3211	0,2713	0,2369	0,2114	0,1921	0,1766
0,2	0,8710	0,6350	0,5101	0,4319	0,3777	0,3375	0,3065	0,2817
0,3	1,0863	0,8181	0,6638	0,5644	0,4947	0,4428	0,4025	0,3701
0,4	1,2307	0,9665	0,7944	0,6793	0,5973	0,5357	0,4875	0,4486
0,5	1,3128	1,0863	0,9067	0,7808	0,6891	0,6194	0,5644	0,5200
0,6	1,3375	1,1808	1,0035	0,8711	0,7720	0,6957	0,6352	0,5859
0,7	1,3080	1,2519	1,0863	0,9515	0,8475	0,7660	0,7007	0,6471
0,8	1,2271	1,3011	1,1562	1,0230	0,9161	0,8307	0,7614	0,7043
0,9	1,2158	1,3294	1,2140	1,0863	0,9785	0,8905	0,8182	0,7580
1,0	1,2158	1,3354	1,2603	1,1418	1,0351	0,9456	0,8711	0,8085

Висновки

Розроблені математичні моделі для визначення приведеного коефіцієнту тертя при взаємодії нитки з кільцевими та трубчастими спрямовувачами нитки трикотажних машин з урахуванням їх реальних фізико – механічних властивостей, структури та умов переробки на технологічному обладнанні.

Розроблений алгоритм методу половинного розділення відрізку при розв'язанні трансцендентних рівнянь та програмне забезпечення для визначення висоти сегменту заповненого матеріалом нитки, радіального кута охвату поверхні нитки напрямною поверхнею та приведеного коефіцієнту тертя.

Встановлені графічні залежності приведеного коефіцієнту тертя від співвідношення внутрішнього радіусу кільцевих та трубчастих спрямовувачів та розрахункового радіусі поперечного перетину нитки, що дозволяє оптимізувати геометричні параметри робочих органів системи подачі ниток на трикотажному обладнанні з позиції мінімізації натягу в робочій зоні.

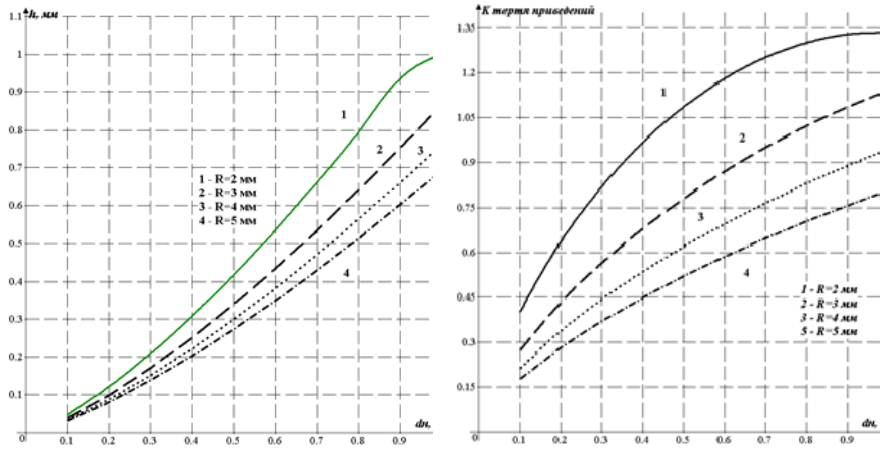


Рис. 3. Графічні залежності висоти h сегменту та приведеного коефіцієнту тертя

Література

1. Щербань В.Ю. Алгоритмічні, програмні та математичні компоненти САПР в індустрії моди / В.Ю. Щербань, О.З. Колиско, М.І. Шолудько, В.Ю. Калашник. – К. : Освіта України, 2017. – 745 с.

2. Щербань В. Ю. Математичні моделі в САПР. Обрані розділи та приклади застосування / В. Ю. Щербань, С. М. Краснитський, В. Г. Резанова. – К. : КНУТД, 2011. – 220 с.

3. Щербань В.Ю. Механика нити / В.Ю. Щербань, О.Н. Хомяк, Ю.Ю. Щербань. – К. : Бібліотека офіційних видань, 2002. – 196 с.

4. Щербань В.Ю. Оптимізація процесу взаємодії нитки з напрямними з урахуванням анізотропії фрикційних властивостей / В.Ю. Щербань, М.І. Шолудько, О.З. Колиско, В.Ю. Калашник // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – № 3(225). – С. 30–33.

5. Щербань В.Ю. Дослідження впливу матеріалу нитки і анізотропії тертя на її натяг і форму осі / В.Ю. Щербань, В.Ю. Калашник, О.З. Колиско, М.І. Шолудько // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – № 2(223). – С. 25–29.

6. Колиско М.І. Визначення впливу зминання та жорсткості на згин на натяг нитки при її взаємодії з циліндричною напрямною / М.І. Колиско, В.Ю. Щербань// Вісник Хмельницького національного університету. – 2013. – № 6. – С.10–13.

7. Щербань В.Ю. Порівняльний аналіз роботи нитконатягувачів текстильних машин / В.Ю. Щербань, Н.І. Мурза, А.М. Кириченко, М.І. Шолудько // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2016. – № 6(243). – С. 18–21.

8. Щербань В.Ю. Ефективність роботи компенсаторів натягу нитки трикотажних машин / В.Ю. Щербань, Н.І. Мурза, А.М. Кириченко, М.І. Шолудько // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 1(245). – С. 83–86.

9. Scherban V. Interaction yarn guide surface / V. Scerban, M. Sholudko, V. Kalashnik, O. Kolisko // Intellectual Archive, Toronto: Shiny World Corp., Richmond Hill, Ontario, Canada. – May 2015. – Volume 4.– Number 3. – pp. 10–15.

10. Scherban V. Kinematics of threads cooperates with the guiding surfaces of arbitrary profile / V. Scherban, N. Murza, O. Kolisko, M. Sheludko, I. Semenova // Intellectual Archive, Toronto: Shiny World Corp., Richmond Hill, Ontario, Canada. – May/June – 2016. – Volume 5.– Number 3. – pp. 23–27.

11. Scherban V. Basic parameters of curvature and torsion of the deformable thread in contact with runner / V. Scherban, N. Murza, A. Kirichenko, O. Kolisko, M. Sholudko // Intellectual Archive, Toronto: Shiny World Corp., Richmond Hill, Ontario, Canada. – Nov/Des – 2016. – Volume 10.– Number 2. – pp. 18–23.

12. Scherban V. Equalizations of dynamics of filament interactive with surface / V. Scherban, G. Melnik, A. Kirichenko, O. Kolisko, M. Sheludko // Intellectual Archive, Toronto: Shiny World Corp., Richmond Hill,

Ontario, Canada. – January/February 2017. – Volume 6. – Number 1. – pp. 22–26.

13. Шилакадзе М. Лифтовые приводы с фрикционной лебедкой / М. Шилакадзе. – Тбилиси : Издательский дом «Технический университет», 2013. – 148 с.

References

1. Scherban V.Yu. Algorithmic, software and mathematical components of CAD in the fashion industry / V.Yu. Scherban, O.Z. Kolisko, M.I. Sholudko, V.Yu. Kalashnik. - K.: Education of Ukraine, 2017. - 745 p.

2. Scherban V. Yu. Mathematical Models in CAD. Selected sections and examples of application / V. Yu. Scherban, S. M. Krasnitsky, V. G. Rezanov. - K.: KNUTD, 2011. - 220 p.

3. Scherban V.Yu. Mechanics of Threads / V.Yu. Scherban, O.N. Khomyak, Yu.Yu.Scherban. K .: Library of Official Publications, 2002.- 196 p.

4. Scherban V.Yu., Sholudko M.I., Kolisko O.Z., Kalashnik V.Yu. Optimization of the process of interaction of a thread with guides, taking into account the anisotropy of frictional properties. Herald of Khmelnytskyi national university. Technical sciences. Khmelnitskyi.2015.Volume 225. Issue 3. pp.30-33.

5. Scherban V.Yu., Kalashnik V.Yu., Kolisko O.Z., Sholudko M.I. Investigation of the influence of the thread material and the anisotropy of friction on its tension and the shape of the axis. Khmelnitskyi. Herald of Khmelnytskyi national university. Technical sciences. Khmelnitskyi.2015.Volume 223. Issue 2. pp.25-29.

6. Kolisko M.I., Scherban V.Yu.. Determination of the effect of folding and stiffness on the bend on the tension of the thread when it interacts with the cylindrical guide. Khmelnitskyi. Herald of Khmelnytskyi national university. Technical sciences. Khmelnitskyi.2013.Issue 6. pp.10-13.

7. Scherban V.Yu., Murza N.I., Kirichenko A.N., Sholudko M.I. Comparativec analysis of work of natyazhiteley of filament of textile machines. Khmelnitskyi. Herald of Khmelnytskyi national university. Technical sciences. Khmelnitskyi.2016.Volume 243. Issue 6. pp.18-21.

8. Scherban V.Yu., Murza N.I., Kirichenko A.N., Sholudko M.I. Overall performance of compensators of the filament of knitted cars. Khmelnitskyi. Herald of Khmelnytskyi national university. Technical sciences. Khmelnitskyi.2017.Volume 245. Issue 1. pp.83-86.

9. Scherban V. Interaction yarn guide surface/V.Scerban, M. Sholudko, V. Kalashnik, O. Kolisko // Intellectual Archive, Toronto: Shiny World Corp., Richmond Hill, Ontario, Canada. – May 2015. – Volume 4.- Number 3. – pp. 10-15.

10. Scherban V. Kinematics of threads cooperates with the guiding surfaces of arbitrary profile / V. Scherban, N. Murza, O. Kolisko, M. Sheludko, I. Semenova // Intellectual Archive, Toronto: Shiny World Corp., Richmond Hill, Ontario, Canada. – May/June - 2016. – Volume 5.- Number 3. – pp. 23-27.

11. Scherban V. Basic parameters of curvature and torsion of the deformable thread in contact with runner / V. Scherban, N. Murza, A. Kirichenko, O. Kolisko, M. Sholudko // Intellectual Archive, Toronto: Shiny World Corp., Richmond Hill, Ontario, Canada. – Nov/Des - 2016. – Volume 10.- Number 2. – pp. 18-23.

12. Scherban V. Equalizations of dynamics of filament interactive with surface / V. Scherban, G. Melnik, A.Kirichenko, O. Kolisko, M. Sheludko // Intellectual Archive, Toronto: Shiny World Corp., Richmond Hill, Ontario, Canada. – January/February 2017. – Volume 6.- Number 1. – pp. 22-26.

13. Shilakadze M. Elevator drives with a friction winch. - Tbilisi: Publishing house "Technical University", 2013. - 148 p.

Рецензія/Peer review : 20.11.2017 р. Надрукована/Printed :08.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. В.Г. Здоренко

УДК 620.66.022

О.П. БУРМІСТЕНКОВ, Т.Я. БІЛА, В.В. СТАЦЕНКО
Київський національний університет технологій та дизайну

ОСНОВНІ НАПРЯМКИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ЗМІШУВАЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ ДЛЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

В статті наведений аналіз етапів приготування композицій із сипких матеріалів в змішувальних комплексах безперервної дії. Встановлено основні параметри, що обумовлюють процес приготування композицій, та їх вплив на якість кінцевого продукту. Сформульовані вимоги до цих параметрів та принципів їх автоматичного регулювання.

Ключові слова: бункер, дозатор, змішувач, автоматизація, моделі, параметри.

O.P. BURMISTENKOV, T.Y. BILA, V.V. STATSENKO
Kyiv National University of Technologies and Design

THE MAIN AUTOMATION DIRECTIONS OF CONTINUOUS ACTION MIXING COMPLEXES FOR BULK MATERIALS

The aim of the research is to determine the main automations directions of continuous action mixing complexes for bulk materials. The technological equipment for the continuous mixing of bulk materials is widely used in various industries. The main parameters of such equipment are the productivity, and uniformity of the mixture that is obtained. The complex nature of the bulk materials particles movement, their tendency to form agglomerations, causes specific requirements for control systems of mixing systems. The basic groups of problems which the automated control system of a mixing complex should solve are considered in the work. Control system performance indicators, external and internal parameters are given. The presented control system includes: bunkers of the mixture main and key components, feeders, bulk flow generators, dosers, mixer and control device based on the microcontroller. During the system operation, the microcontroller compares the signals of the mixture components flow sensors installed at the outlet of the dosers with the values specified by operator. Also, the signal of the mixture homogeneity sensor installed at the mixer outlet is compared with the set value. Feeder and mixer control signals are generated based on the results of comparisons. Feeder control allows changing the percentage composition of the mixture. The mixer control allows changing the residence time of particles in it and thus changing the mixture uniformity. The principles of a mixing complex organization are formulated in the work from the managing its basic parameters point of view. Also directions of the mixing systems further improvement are formulated.

Keywords: hopper, doser, mixer, automation, models, parameters.

Вступ

В різних галузях промисловості знаходить широке застосування технологічне обладнання безперервної дії для отримання кінцевого продукту певної якості.

В роботі [1] проаналізований процес виготовлення композиції із сипких (порошкоподібних і гранульованих) матеріалів, встановлено параметри, що впливають на якість готової композиції як початкової сировини для виробництва виробів, наприклад, взуття, плівкових матеріалів, штучних шкір, труб з полімерних матеріалів тощо.

Будь-який технологічний процес має задовольняти основну вимогу: забезпечувати високу якість кінцевого продукту при максимальній продуктивності технологічної лінії. Якість продукції визначається властивостями вхідних матеріалів, режимами роботи обладнання, що використовується в лінії, збурюючими діями на нього тощо. Продуктивність технологічної лінії залежить від тривалості технологічного процесу та простою обладнання, втратами часу при переході до нового виду продукції або сировини та на планові і аварійні роботи.

Якість продукції та продуктивність лінії взаємопов’язані, їх системи керування не можуть бути повністю автономні, але в багатьох випадках їх взаємодія може бути суттєво обмежена.

Система керування якістю має бути оперативною та її робота обумовлюється показником якості кінцевого продукту (для змішувальних комплексів сипких матеріалів – це однорідність суміші на виході змішувача). Система керування продуктивністю складається із систем керування параметрами технологічного процесу, транспортними операціями та міжопераційними запасами.

Найбільш важливою стадією в виробництві виробів із полімерних матеріалів, що використовують порошкоподібні та гранульовані вхідні компоненти (смоли ПВХ, поліетилен, різні наповнювачі та ін.), є процес приготування композицій, який дає можливість оперативно впливати на склад і однорідність суміші та багато в чому визначає якість кінцевого продукту.

Тому розробка автоматизованих систем керування технологічними процесами приготування композицій для виготовлення виробів із полімерних матеріалів, на наш погляд, представляє безперечний інтерес.

Постановка завдання

Завданням дослідження є вивчення процесу приготування композицій із сипких матеріалів для виробництва виробів із полімерних матеріалів з метою оцінювання параметрів, що визначають якість суміші на кожному етапі її виготовлення, та можливості їх автоматичного регулювання, тобто створення автоматизованих комплексів безперервної дії для приготування композицій з сипких матеріалів.

Результати та їх обговорення

Автоматизовані змішувальні комплекси (АЗК) безперервної дії для сипких матеріалів складаються з

бункерів для приймання та зберігання вхідної сировини, транспортних систем, що з'єднують окремі елементи комплексу між собою, дозувальних пристроїв та змішувачів [2].

На процес виготовлення композицій впливає множина факторів: конструктивні та технологічні параметри обладнання, що входить в АЗК, фізико-механічні властивості вхідних компонентів та їх співвідношення у суміші, динаміка сипкого середовища на всіх етапах виготовлення сумішей тощо. Тому під час розробки системи керування виготовленням сипких композицій із порошкоподібних та гранульованих матеріалів виникають задачі, що оперують великою кількістю даних, розв'язок яких без використання мікропроцесорної техніки є складним.

Кожний етап приготування композицій має відносну самостійність, але кінцевий результат залежить від цілеспрямованої дії на потік сипкого матеріалу в усіх пристроях, що утворюють технологічний процес. Виходячи з відносної самостійності кожного етапу, доцільно використовувати децентралізовану систему автоматичного керування потоком сипкого матеріалу на кожному етапі з корекцією за кінцевим результатом. Таку систему керування АЗК можна поділити на наступні функціональні групи.

1) Регулювання параметрів процесів завантаження, вивантаження та зберігання сипких матеріалів в бункерних пристроях.

2) Керування формуванням, транспортуванням та дозуванням потоками сипких матеріалів.

3) Керування параметрами процесу змішування вхідних компонентів у змішувачі безперервної дії.

4) Корегування рецептур із системою врахування змін властивостей вхідній сировини та вимог до кінцевого виробу.

Перераховані групи визначають основні завдання, що стоять перед дослідниками та розробниками змішувальних комплексів.

Основним функціональним призначенням бункерного пристрою є забезпечення зберігання та рівномірного витікання потоку сипкого матеріалу в зону дозувальних пристроїв, тобто створення постійних швидкості потоку та об'ємної маси сипкого матеріалу у відповідності до вимог технологічного процесу в цілому.

В даний час це досягається конструктивними рішеннями та замкненими системами регулювання параметрів, які визначають процес течії сипкого матеріалу [2].

Детальний аналіз напрямів вдосконалення бункерних пристроїв наведено у роботі [1], де також запропонована системна модель бункерного пристрою у відповідності до його функціонального призначення:

$$\overline{Z} = F(\overline{X}, \overline{Y}),$$

де $\overline{Z}$, $\overline{X}$, $\overline{Y}$ – відповідно, вектори функцій показників ефективності, зовнішні та внутрішні параметри АЗК, що визначають його роботу для забезпечення заданої якості композиції.

До показників ефективності $\overline{Z}$ відносять показники продуктивності, втрат електроенергії, надійності тощо. Зовнішніми параметрами $\overline{X}$ є тривалість перебування сипкого матеріалу в бункері, його температура та вологість, спосіб завантаження та вивантаження матеріалу з бункера та ін. До внутрішніх параметрів $\overline{Y}$ відносять конструктивні параметри бункера, що визначають його роботу. Системна та параметрична моделі є основою для створення автоматизованих бункерних пристроїв.

В роботі [2] розглянуті деякі питання, що пов'язані з формуванням потоку сипкого матеріалу між бункером та дозатором. Дозування сипких матеріалів складний та тривалий процес, що залежить від багатьох факторів: фізико-механічних властивостей компонентів, що змішуються, похибки вимірювання (зважування) компонентів, швидкості руху потоку сипких матеріалів через вимірювальні пристрої тощо.

З врахуванням вище викладеного запропонована структурна схема автоматизованого змішувального комплексу для сипких матеріалів з системою керування на базі мікроконтролера (рис. 1).

Цей комплекс забезпечує можливість виготовлення сумішей, що складаються з двох компонентів: основного (О) та ключового (К). Напрям руху потоків компонентів на схемі позначено подвійною стрілкою, одинарною стрілкою показано напрямки передачі інформаційних сигналів. Блоки схеми, що відносяться до ключового компоненту, позначені індексом (к).

Сипкий матеріал, що рухається по елементам змішувального комплексу, повинен відповідати умовам нерозривності потоку, рівності швидкостей руху всіх його частинок, а також однорідності матеріалу, тобто відсутні агломеровані частинки.

Сипкий матеріал, що витікає з бункерів (Б, Бк), часто має деяку пульсацію потоку, що може вносити похибки в процес дозування компонентів. Наявність цих пульсацій зумовлена здатністю сипких матеріалів до утворення зводів в зоні вихідних отворів бункерів, які можуть призвести до виникнення розривів у потоці сипкого матеріалу. Зворошувачі різноманітних конструкцій, що використовують для уникнення цього явища, здійснюють механічний вплив на частинки суміші, що також вносить зміни у характер їх руху. Таким чином, виникає необхідність згладжування потоків компонентів сипких матеріалів перед їх змішуванням. Для усунення пульсацій та більш рівномірного подання потоку сипкого матеріалу до вагового дозатора використовують різноманітні живильники та додаткові пристрої [2].

У системі (рис. 1) компоненти з бункерів надходять до тарілчастих живильників (Ж, Жк). Об'ємна продуктивність яких практично лінійно залежить від положення ножа, який знімає сипкий матеріал з тарілі. Керування положення ножа можна здійснювати за допомогою приводу на основі крокового електродвигуна, сигнали керування яким формуватиме мікроконтролер (МК).

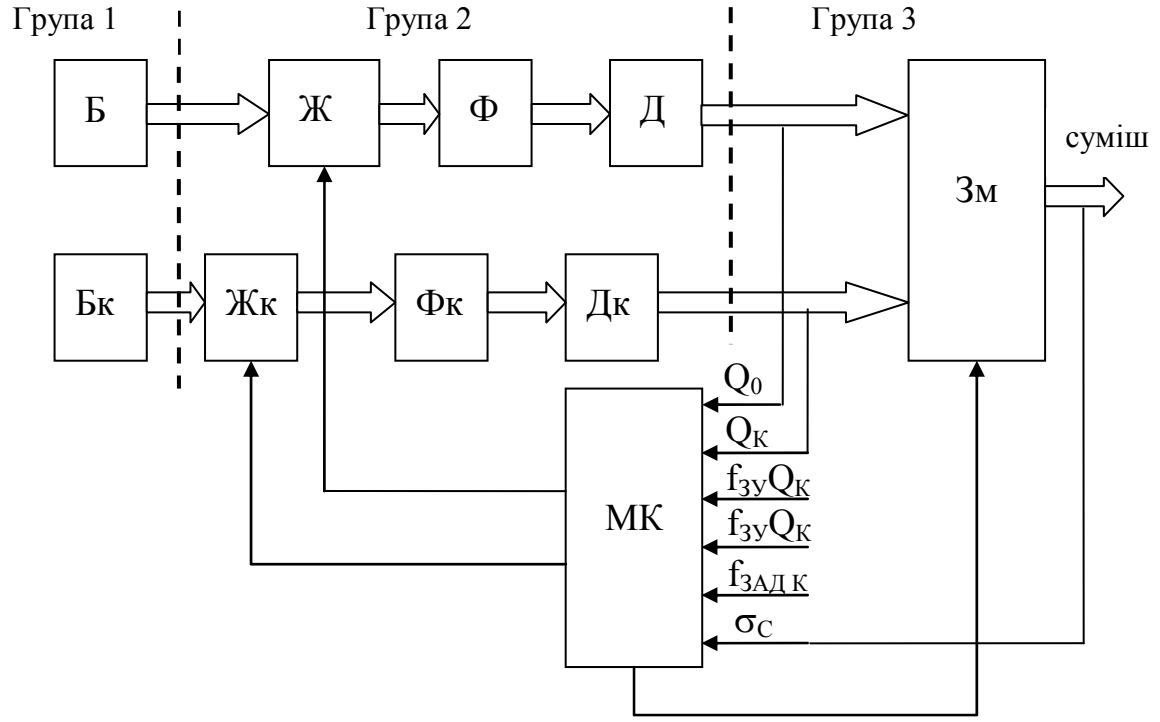


Рис. 1. Структурна схема змішувального комплексу двох компонентів

В якості додаткових пристроїв використовують формувальні лотки. Сипкий матеріал повинен рухатись по лотку одним шаром для забезпечення однорідності вимірювань. Для цього пропонується використовувати формувальні лотки (формувачі, Ф, Фк), що виконані певним чином, наприклад, у формі циклоїди, яка створює умови рівності швидкостей всіх частинок в кінці потоку перед вимірювальною площиною. Після формувачів матеріал потрапляє у відповідні дозатори (Д, Дк), на виході яких здійснюється зважування і формуються сигнали, що вказують витрату компонентів суміші, Q_0 та $Q_К$. Ці сигнали подаються на вхід МК і використовуються для перевірки відповідності продуктивності дозаторів заданим значенням.

Далі потоки сипких матеріалів потрапляють у змішувач (Зм), на виході якого здійснюється контроль однорідності суміші ($\sigma_С$) за допомогою ємнісного датчика та формується відповідний сигнал, який також подається на вхід МК.

Мікроконтролер порівнює сигнали датчиків із значеннями $f_{зу}Q_О$, $f_{зу}Q_К$ та $f_{зад}К$, які задає оператор. Ці сигнали визначають необхідні значення витрати основного, ключового компонентів та однорідності суміші, відповідно. Співвідношення значень витрат ключового та основного компонентів суміші визначає її відсотковий склад, а однорідність – зміну відсоткового складу у потоці готової композиції. Таким чином, сигнали цих датчиків дозволяють отримати необхідну інформацію про якість суміші.

Якщо сигнали завдання та відповідних датчиків співпадають, робота АЗК відповідає вимогам, якщо ні, то перевіряється версія можливих відхилень продуктивності живильників основного та ключового компонентів. При виявлені відхилень продуктивності подається сигнал на зміну режиму роботи живильника у бік зменшення або збільшення витрати сипкого матеріалу.

За відсутності відхилень у роботі транспортувальних пристроїв основного та ключового компонентів, але за наявності неузгодженості сигналів датчика неоднорідності суміші на виході змішувального комплексу та завдання, формується сигнал на зміну режимів роботи змішувача, наприклад, збільшується або зменшується час перебування матеріалу у внутрішньому об'ємі змішувача. Для цього змінюються режими роботи робочих органів змішувача, наприклад, у випадку використання відцентрового змішувача безперервної дії, змінюється швидкість обертання ротора, що призводить до зміни форми траєкторії руху частинок та, відповідно, зміні тривалості процесу змішування.

Під час розробки автоматизованих змішувальних комплексів безперервної дії для сипких матеріалів виникають дві задачі: безперервного зважування компонентів для контролю продуктивності та безперервного вимірювання неоднорідності суміші для контролю якості готової суміші.

Виходячи із викладеного вище, можна зробити висновок, що для отримання суміші заданої якості достатньо вміти контролювати два основні параметри (за умови стабільності або випадкових змін інших) однорідність суміші та продуктивність агрегату.

З цією метою можна використати метод нечіткої логіки, що знаходить все більше застосування [3]. При проектуванні цих систем замість диференційних рівнянь використовують сукупність експертних оцінок, що дозволяє врахувати складний характер процесів, які мають місце у процесі роботи технологічного обладнання, не створюючи фізичну модель взаємодії частинок суміші із робочими органами.

При проектуванні систем на основі нечіткої логіки формують вектор вхідних сигналів. Для кожного з них у «нечіткій» формі задають можливі значення (наприклад, «великий», «малий», «середній» і т.п.) та складають матрицю, що включає всі комбінації цих значень. Проводять опитування експертів, які визначають реакцію системи для кожної можливої комбінації сигналів. Далі задають функції приналежності для всіх вхідних і вихідних сигналів, що встановлюють співвідношення між фактичними значеннями сигналів та їх «нечіткими» представленнями. В результаті такі системи дозволяють враховувати специфіку роботи обладнання, яку складно описати за допомогою диференційних рівнянь. Наприклад, системи керування на основі «нечіткої» логіки можуть ігнорувати короткочасні відхилення у потоках сипких матеріалів, які неможливо виправити за рахунок зміни режимів роботи дозаторів.

Висновки

Проаналізована робота автоматизованого змішувального комплексу безперервної дії для сипких матеріалів. Сформульовані принципи організації комплексу з точки зору регулювання його основних параметрів із використанням мікропроцесорної техніки. Сформульовані напрями подальшого вдосконалення змішувальних комплексів.

Література

1. Стаценко В.В. Системна і параметрична моделі бункерних пристроїв в агрегатах для приготування композицій із сипких матеріалів / Т.Я. Біла, О.П. Бурмістенков // Вісник КНУТД. Технічні науки. – 2016. – № 6. – С. 60–69.

2. Стаценко В.В. Автоматизовані комплекси безперервного приготування композицій сипких матеріалів : монографія / В.В. Стаценко, О.П. Бурмістенков, Т.Я. Біла. – Київ : КНУТД, 2017. – 220 с.

3. Біла Т.Я. Створення системи керування дозаторами сипких матеріалів на основі контролеру нечіткої логіки / Т.Я. Біла, В.В. Стаценко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2015. – № 6. – С. 73–76.

References

1. Statsenko V.V. Systemna i parametrychna modeli bunkernykh prystroiv v ahrehatakh dlia pryhotuvannia kompozytsii iz sypkykh materialiv / Bila T.Ia., Burmistenkov O.P. // Visnyk KNUTD. Tekhnichni nauky. – 2016. – № 6, S. 60-69.

2. Statsenko V.V. Avtomatyzovani kompleksy bezperervnoho pryhotuvannia kompozytsii sypkykh materialiv: monohrafiia / V.V. Statsenko, O.P. Burmistenkov, T.Ia. Bila. – Kyiv: KNUTD, 2017. – 220 s.

3. Bila T.Ia. Stvorennia systemy keruvannia dozatoramy sypkykh materialiv na osnovi kontroleru nechitkoi lohiky / T.Ia. Bila, V.V. Statsenko // Visnyk KhNU. – 2015. – № 6, S. 73-76.

Рецензія/Peer review : 09.11.2017 р. Надрукована/Printed :09.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Петко І.В.

УДК 621.365.5:537.856

Ю. В. БАТЫГИН, Е. А. ЧАПЛЫГИН, О. С. САБОКАРЬ, В. А. СТРЕЛЬНИКОВА
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ ВО ВНУТРЕННЕЙ ПОЛОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СОЛЕНОИДА. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

В работе рассматривается аналитическое описание электродинамической задачи модели индукционного нагрева зубчатых цилиндрических заготовок. Полученные в ходе решения зависимости позволяют качественно и количественно оценить процесс нагрева и ключевые параметры системы, влияющие на его эффективность. Окончательные математические выражения, представленные в работе, могут быть использованы для дальнейшего теоретического анализа, а также для расчёта возможных технических реализаций подобной системы. Представленные результаты работы показывают, что наиболее существенным параметром, оказывающим влияние на процесс нагрева, является количество ампер-витков рабочего индуктора.

Ключевые слова: индукционный нагрев, электродинамическая задача, вихревые токи, уравнения Максвелла, скин-слой.

YU. V. BATYGIN, YE. A. CHAPLYGIN, O. S. SABOKAR, V. A. STRELNIKOVA
Kharkov National Automobile and Highway University

INDUCTION HEATING IN THE INNER CAVITY OF THE CYLINDRICAL SOLENOID. RUNNING PROCESSES MAIN RELATIONSHIPS

The paper deals with an analytical description of the electrodynamic problem of the induction heating model of gear cylindrical blanks. The dependencies obtained in the course of the solution make it possible to qualitatively and quantitatively evaluate the heating process and the key parameters of the system that affect its efficiency. The final mathematical expressions presented in the paper can be used for further theoretical analysis, as well as for calculating possible technical realizations of such a system. The presented results show that the most significant parameter affecting the heating process is the number of ampere-turns of the working inductor.

Keywords: induction heating, electrodynamic problem, eddy currents, Maxwell's equations, skin layer.

Введение

Индукционный нагрев является одним из основных технологических этапов большого количества производственных операций в машиностроительной отрасли. Альтернативой последним является предложение использования индукционного нагрева не только на этапах производства узлов и деталей механизмов, но и на этапах их дальнейшего обслуживания и ремонта. Использование локального и быстрого нагрева, по мнению исследователей, позволяет решить техническую проблему, связанную с выполнением демонтажа или разборки деталей, контактный слой которых подвергался коррозионному воздействию со стороны среды, что в большинстве случаев делает невозможным выполнение упомянутой операции. Несмотря на достаточное количество инженерных решений связанных с описанием процессов нагрева и электродинамических процессов, решение конкретной электрофизической и термодинамической задачи является ключевым этапом в создании высокоэффективных систем индукционного нагрева. Использование готовых решений для количественного описания процессов нагрева, несмотря на их обобщенность, имеет достаточно узкий круг использования, так как имеет ряд ограничений, связанных с конкретно выбранной моделью системы, поэтому они не могут быть использованы в качестве фундаментального описания физического процесса. Именно по этой причине задачи связанные с разработкой новых систем, повышением эффективности нагрева или повышением общего КПД системы требуют выполнения аналитического анализа, основанного на рассмотрении конкретно выбранной модели с ее полным описанием.

Из физических соображений, очевидно, что уровень электромагнитной связи в системе «индуктор – нагреваемый металл» достаточно высок, когда по условиям выполняемой производственной операции объект обработки может быть помещён во внутреннюю полость индуктора. К таковым, например, можно отнести ремонтные операции по разъему болтовых соединений, разборке узлов сочленения компонент разного рода сложных конструкций, выпрессовки наглухо посаженных фиксаторов и др. [1]. Инструментом вышеуказанных производственных операций может служить протяженный многовитковой цилиндрический соленоид. Его внутренняя полость является рабочей зоной, где осуществляется индукционный нагрев обрабатываемого объекта. Собственно соленоид является элементом – L-резонансного «LC»-контура и подключается параллельно емкостному накопителю энергии – C [2].

Цель и задачи исследования

Целью настоящего рассмотрения является теоретический анализ электромагнитных и тепловых процессов в системе из протяжённого многовиткового соленоида, во внутреннюю полость которого помещен коаксиальный сплошной металлический цилиндр (рис. 1а).

Следует отметить, что подобные задачи решались в работах [3, 4]. Однако, непосредственное использование полученных результатов невозможно, ввиду их ограниченности рамками поставленных задач.

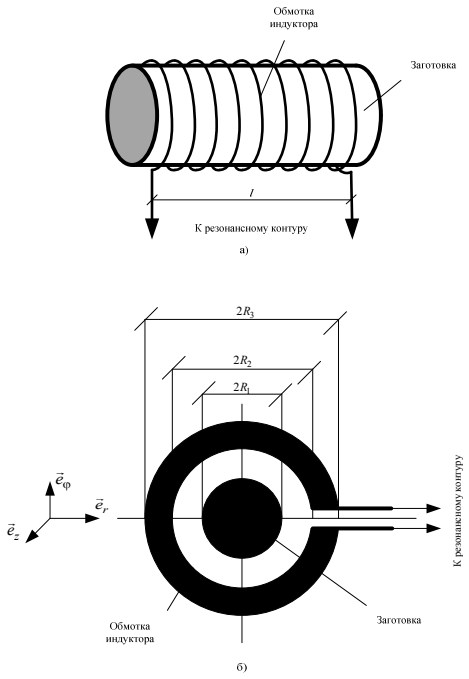


Рис. 1. Цилиндрическая система индукционного нагрева: а) схематическое изображение, *l* – длина обмотки индуктора; б) расчётная модель в цилиндрической системе координат

Электромагнитные процессы, основные соотношения.

В качестве расчётной модели можно рассмотреть и принять геометрию поперечного сечения системы «многовитковой индуктор – внутренний сплошной коаксиальный цилиндр» в цилиндрических координатах (рис. 1б.)

При решении поставленной задачи полагаем, что:

- наличием разреза в области токоподводов можно пренебречь и считать, что имеет место круговая симметрия, когда $\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$ (φ – азимутальный угол);
- индуктор является достаточно протяжённым $\left(\frac{l}{R_1} >> 1\right)$ так, что реальной неоднократностью поля в направлении орта $\vec{e}_z$ можно пренебречь и считать, что $\frac{\partial}{\partial z} \approx 0$;
- энергия возбуждаемого магнитного поля сконцентрирована во внутренней полости соленоида и на его внутренней поверхности продольная z–компонента напряжённости будет равна: $H_i(t) = \frac{W \cdot J_i(t)}{l_i}$, где t – время, W – число витков, $J_i(t)$ – возбуждающий ток, l_i – длина обмотки индуктора;
- приемлемо условие квазистационарности, так что $\omega \cdot \frac{a}{c} << 1$ где ω – характерная циклическая частота в спектре возбуждающего тока, a – характерный размер системы, c – скорость света в вакууме.

Что бы избежать излишнего загромождения ссылками на использованные литературные источники, укажем, что решение поставленной задачи проведено аналогично тому, как это было сделано авторами работ [3–5]. Дополнительную информацию о применяемом математическом аппарате можно найти в справочном руководстве [6].

Соответственно принятым допущениям и расчетной модели на (рис. 1.б) уравнения Максвелла для нетривиальных составляющих напряжённости электромагнитного поля $(E_\varphi \neq 0, H_z \neq 0)$, преобразованных по Лапласу с учетом нулевых начальных условий, могут быть записаны в виде:

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left(r \cdot E_\varphi(p,r) \right) = -\mu_0 p \cdot H_z(p,r) & (1) \\ -\frac{\partial H_z(p,z)}{\partial r} = \varepsilon_0 p \cdot E_\varphi(p,r) & (2) \\ -\frac{\partial H_z(p,r)}{\partial r} = \gamma \cdot E_\varphi(p,r) & (3) \end{cases}$$

где p – параметр преобразования Лапласа,

μ_0 и ε_0 – магнитная и диэлектрическая проницаемости вакуума,

γ – электропроводность металла заготовки.

Из дифференциальной системы (1)–(3) получаем уравнение для напряженности электрического поля в средах с различными электрофизическими характеристиками:

$$\frac{\partial}{\partial r} \cdot \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot E_\varphi(p,r) \right) \right) - k_{1,2}^2(p) \cdot E_\varphi(p,r) = 0 \quad (4)$$

где $k_{1,2}(p)$ – волновые числа,

$$k(p) = \begin{cases} k(p) = \frac{p}{c}, & \text{– для областей с диэлектрическим заполнением} \\ c & \text{– скорость света в вакууме} \\ k(p) = \sqrt{p \mu \gamma}, & \text{– для областей с конечной проводимостью} \end{cases}$$

Фундаментальная система решений уравнения (4) есть модифицированные функции Бесселя

первого порядка – $I_1(z), K_1(z)$.

Соответственно, общие интегралы для напряженности электрического поля запишутся в виде:

а) в воздушном зазоре между внутренней поверхностью обмотки индуктора и внешней поверхностью заготовки, $r \in [R_1, R_2]$:

$$E_{\varphi}^{(1)}(p,r) = A(p)\cdot I_1\left(k_1(p)\cdot r\right) + B(p)\cdot K_1\left(k_1(p)\cdot r\right) \tag{5}$$

б) в металле цилиндрической заготовки, $r \in [0, R_1]$ условию ограниченности в нуле пространственной переменной удовлетворяет функция:

$$E_{\varphi}^{(2)}(p,r) = C(p)\cdot I_1\left(k_2(p)\cdot r\right) \tag{6}$$

где $A(p), B(p), C(p)$ – произвольные постоянные интегрирования.

Неизвестные произвольные постоянные интегрирования в выражениях для компонент векторов электромагнитного поля можно найти с помощью соответствующих граничных условий и выразить их, в конечном итоге, через величину операторной формы тока $J_i(p) = L\{J_i(t)\}$.

В конечном итоге нас интересуют процессы в нагреваемом объекте. Из системы линейных алгебраических уравнений известными методами находим, что

$$H_z^{(2)}(p,r) = -\left(\frac{Z_0\cdot\gamma\cdot W\cdot R_1}{l}\right)\cdot\frac{J_i(p)}{(k_1(p)\cdot R_1)(k_2(p)\cdot R_1)}\cdot\frac{1}{\Delta(p)}\cdot I_0\left(k_2(p)\cdot r\right) \tag{7}$$

где $\Delta(p) = I_1\left(k_2(p)\cdot R_1\right)\cdot F_1(p) - \sqrt{\frac{\gamma}{p\cdot\varepsilon_0}}\cdot I_0\left(k_2(p)\cdot R_1\right)\cdot F_2(p),$

$F_1(p) = K_0\left(k_1(p)\cdot R_2\right)\cdot I_0\left(k_1(p)\cdot R_1\right) - K_0\left(k_1(p)\cdot R_1\right)\cdot I_0\left(k_1(p)\cdot R_2\right),$

$F_2(p) = K_1\left(k_1(p)\cdot R_1\right)\cdot I_0\left(k_1(p)\cdot R_2\right) + K_0\left(k_1(p)\cdot R_2\right)\cdot I_1\left(k_1(p)\cdot R_1\right).$

Индуцированный ток

С помощью закона полного тока L–изображение индуцированного тока $J(p)$ можно найти, полагая, что он протекает по азимуту в сплошной цилиндрической заготовке радиуса – R_1 и длиной – l.

С привлечением зависимости (7) получаем, что

$$J(p) \approx l\cdot\left(H_z^{(2)}(p,0) - H_z^{(2)}(p,R_1)\right) = \frac{\left(W\cdot Z_0\cdot\gamma\cdot R_1\right)}{\left(\left(k_2(p)\cdot R_1\right)\cdot\left(k_1(p)\cdot R_1\right)\right)}\cdot J_i(p)\cdot\frac{\left(I_0\left(k_2(p)\cdot R_1\right)-1\right)}{\Delta(p)} \tag{8}$$

Выражение (8) можно упростить, если учесть реальные условия выполнения ремонтных операций, требующих индукционного нагрева рабочих объектов. Для конкретных оценок будем ориентироваться на их характерные радиальные размеры ~ 0,01-0,05 м и рабочие частоты порядка ~ 30-50 кГц. Как правило, элементы крепежа изготовлены из стали с удельной электропроводностью $\sim 0,4\cdot 10^7$ 1/Ом·м.

Приближённые оценки показывают, что принятым характеристикам объектов индукционного нагрева, соответствуют предельные оценки аргументов модифицированных функций Бесселя:

$$\left|k_1(p)\cdot R_{1,2}\right| \approx \frac{\omega}{c}\cdot R_{1,2} \ll 1, \quad \left|k_2(p)\cdot R_{1,2}\right| \approx \sqrt{\omega\cdot\gamma\cdot\mu_0}\cdot R_{1,2} \gg 1. \tag{9}$$

Примечание. Оценка $\left|k_2(p)\cdot R_{1,2}\right| \approx \sqrt{\omega\cdot\gamma\cdot\mu_0}\cdot R_{1,2} \gg 1$ соответствует минимуму значения волнового числа – $k_2(p) = \sqrt{p\mu_0\gamma}$, поскольку в случае магнитного металла растёт величина магнитной проницаемости

($\mu_0 \to \mu_0\cdot\mu_r$, $\mu_r > 1$, μ_r – относительная магнитная проницаемость). Данное обстоятельство позволяет считать справедливыми дальнейшие выводы и для ферромагнитных объектов нагрева.

Неравенства (9) позволяют воспользоваться асимптотическими представлениями и соответствующими разложениями в окрестности нуля для модифицированных функций Бесселя.

После необходимых тождественных преобразований в выражении (8) получаем, что

$$J(p) \approx W\cdot J_i(p)\cdot\frac{\left(1-\sqrt{2\pi\cdot\left(k_2(p)R_1\right)}\cdot\exp\left(-k_2(p)R_1\right)\right)}{\left(\frac{\left(k_1(p)R_1\right)\cdot\left(k_2(p)R_2\right)}{\left(Z_0\gamma R_1\right)}\cdot\left(\frac{R_1}{R_2}\right)\cdot\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)-1\right)} \tag{10}$$

Выражение (10) содержит неопределённости

$$\begin{cases}\lim\limits_{(k_2(p)R_1)\to\infty}\sqrt{2\pi\cdot\left(k_2(p)R_1\right)}\cdot\exp\left(-k_2(p)R_1\right) = \|\infty\cdot 0\|, \\ \lim\limits_{\left(\frac{R_1}{R_2}\right)\to 0}\left[\left(\frac{R_1}{R_2}\right)\cdot\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)-1\right] = \|0\cdot\infty\|\end{cases} \tag{11}$$

Первое соотношение в (11) характеризует значимость процессов проникновения возбуждаемых

полей, второе определяет значимость расстояния между источником магнитного поля (рабочая поверхность соленоида) и заготовкой. В конечном итоге, вышеозначенные соотношения устанавливают влияние электромагнитных процессов и геометрии системы на величину индуцированного тока.

Раскрывая математические неопределённости в зависимостях (11), получаем, что оба предела будут равны нулю. С учетом данного результата можно получить в пространстве оригиналов прямопропорциональную связь между возбуждающим током соленоида и током, индуцированным в металле нагреваемой цилиндрической заготовки.

$$J(t) \approx W \cdot J_i(t) \tag{12}$$

Полученный результат (12) свидетельствует о том, что величина индуцированного тока в цилиндрических системах индукционного нагрева с рабочими частотами до $\sim 30 \div 50$ кГц и стальными немагнитными образцами ($\sim 0,4 \cdot 10^7$ 1/Ом·м) с поперечными размерами $\sim 0,01 \div 0,05$ м устанавливаются исключительно количеством витков обмотки возбуждающего соленоида – W и не зависит от временных характеристик электромагнитных процессов – ω, а также от геометрии системы, определяемой соотношением $\left(\frac{R_1}{R_2}\right)$.

Температура нагрева

Индукционный нагрев рассматриваемой цилиндрической заготовки в случае гармонического тока в обмотке соленоида можно вычислить в адиабатическом приближении [2, 5].

Положим, что в отсутствии теплообмена имеет место Ленц–Джоулев нагрев лишь той части заготовки, где сконцентрирован индуцированный ток. Развитие процессов проникновения действующих полей позволяет считать, что область концентрации – это «условный» проводник с площадью поперечного сечения $S \approx \delta \cdot l$, где δ – величина скин-слоя, $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \gamma \cdot \mu_0}}$ [1], и длиной $\sim 2\pi R_l$.

Опуская промежуточные преобразования, в конечном итоге, находим приращение температуры образца за время – $\Delta t \gg \frac{2\pi}{\omega}$.

$$\Delta T^\circ \approx \Delta t \cdot \frac{2\pi}{C \cdot \rho \cdot \gamma} \cdot \left(\frac{R_l}{l}\right) \cdot \left(\frac{W \cdot J_m}{S}\right)^2 \tag{13}$$

где C – удельная теплоёмкость,

ρ – плотность,

γ – удельная электропроводность,

J_m – амплитудное значение возбуждающего тока.

Из (13) определим соотношение $\bar{V} = \left(\Delta T^\circ / \Delta t\right)$, представляющее собой динамическую характеристику процесса – среднюю скорость индукционного нагрева.

Принимая, $S = l \cdot \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \gamma \cdot \mu_0}}$ получаем, что

$$\bar{V} = \left(\Delta T^\circ / \Delta t\right) \approx \frac{\pi \cdot \omega \cdot \mu_0}{C \cdot \rho} \cdot \left(\frac{R_l}{l^3}\right) \cdot \left(W \cdot J\right)^2 \tag{14}$$

Из соотношения (14) явно следует основные характерные зависимости средней скорости индукционного нагрева цилиндрической стальной заготовки (как немагнитной, так и магнитной) в поле многовиткового соленоида:

- прямая пропорциональность частоте возбуждающего тока и внешнему размеру заготовки,
- обратная пропорциональность удельной плотности нагреваемого металла,
- квадратичная зависимость от числа ампер-витков соленоида.

Численные оценки, основные результаты

Полученные соотношения проиллюстрируем численными оценками для реальных условий, интересных с практической точки зрения. В качестве исходных возьмём типичные данные из практики известных авторемонтных технологий [1].

Дано:

1. Нагреваемый объект – стальной цилиндр.
2. Удельная электропроводимость – $\gamma = 0,4 \cdot 10^7$ 1/Ом·м.
3. Удельная теплоёмкость – $C = 460$ Дж/кг·град.
4. Плотность – $\rho = 9000$ кг/м^3.
5. Геометрия: длина – $l = 0,05$ м, радиус – $R_l = 0,025$ м.

6. Ампер-витки, $x = W \cdot J$, $x \in [100, 1000]$.

Найти:Отношение температуры ко времени нагрева сплошной металлической заготовки – скорость теплового процесса $\overline{V}(x)$ как функцию числа ампер-витков – $x = W \cdot J$

Вычисления: Для визуальной наглядности результаты вычислений, выполненные с помощью формулы (14), в графическом виде приведены ниже на рис. 2.

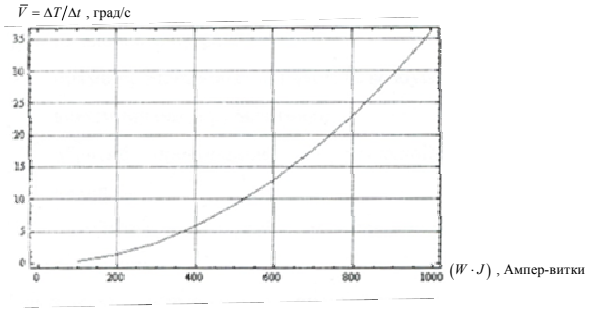


Рис. 2. Характерная зависимость средней скорости индукционного нагрева металлической заготовки в поле цилиндрического соленоида

Из зависимости на рис. 2 следует, что уже при $W \cdot J \approx 550$, что может соответствовать числу витков соленоида 55 и амплитуде возбуждающего тока 10 А, средняя скорость индукционного нагрева составляет 10 град/с, то есть за время 60 с температура нагреваемого объекта может достичь величины 600°.

Выводы

К основным результатам проведенного анализа можно отнести следующее. Получены аналитические соотношения, позволяющие производить оценки характеристик процессов индукционного нагрева с помощью цилиндрических соленоидов.

Показано, что величина индуцируемого тока не зависит от временных параметров возбуждающего поля, размеров заготовки и прямопропорционально зависит только от числа ампер-витков соленоида.

Кроме того, средняя скорость нагрева прямопропорциональна частоте возбуждающего тока и внешнему размеру заготовки; обратнопропорциональна удельной плотности нагреваемого металла; находится в квадратичной зависимости от числа ампер-витков соленоида.

Литература

1. Синельников А. Ф. Кузова легковых автомобилей: обслуживание и ремонт / А. Ф. Синельников, Ю. Л. Штоль, С. А. Скрипников. – М. : Транспорт, 1995. – 256с.

2. Яворский Б. М. Справочник по физике / Б. М. Яворский Б. М., А. А. Детлаф. – М. : Наука, 1968. – 940 с.

3. Слухоцкий А. Е. Установки индукционного нагрева / А. Е. Слухоцкий. – Л. : Энергоиздат, 1981. – 328 с.

4. Батыгин Ю. В. Лавинский В. И. Особенности магнитно-импульсной «раздачи» тонкостенных трубчатых заготовок / Ю. В. Батыгин, В. И. Лавинский // Москва, Электричество. – 2005. – № 11. – С. 62–68.

5. Батыгин Ю. В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий : Т. 1 / Ю. В. Батыгин, В. И. Лавинский, Л. Т. Хименко / [изд. 2-е, перераб. и доп. ; под общ. ред. Батыгина Ю. В.]. – Х. : «ТОРНАДО-Мост», 2003. – 284 с.

6. Корн Т. Справочник по математике / Т. Корн, Г. Корн. – М. : Наука, 1973. – 831 с.

References

1. Synelnykov A. F. Kuzova lehkovykh avtomobylei: obsluzhyvanye y remont / A. F. Synelnykov, Yu. L. Shtol, S. A. Skrypnykov. – M. : Transport, 1995. – 256s.

2. Yavorskyi B. M. Spravochnyk po fyzyke / B. M. Yavorskyi B. M., A. A. Detlaf. – M. : Nauka, 1968. – 940 s.

3. Slukhotskyi A. E. Ustanovky ynduktsyonnoho nahreva / A. E. Slukhotskyi. – L. : Enerhoyzdat, 1981. – 328 s.

4. Batyhyn Yu. V. Lavynskyi V. Y. Osobennosty mahnytno-ympulsnoi «razdachy» tonkostennykh trubchatykh zahotovok / Yu. V. Batyhyn, V. Y. Lavynskyi // Moskva, Elektrychestvo. – 2005. – Issue 11. – S. 62–68.

5. Batыhyn Yu. V. Ympulsnye mahnytnye polia dlia prohressyvnykh tekhnolohyi : T. 1 / Yu. V. Batyhyn, V. Y. Lavynskyi, L. T. Khymenko / [yzd. 2-e, pererab. y dop. ; pod obshch. red. Batyhyna Yu. V.]. – Kh. : «TORNADO-Most», 2003. – 284 s.

6. Korn T. Spravochnyk po matematyke / T. Korn, H. Korn. – M. : Nauka, 1973. – 831 s.

Рецензія/Peer review : 19.11.2017 р. Надрукована/Printed :04.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Бажинов О.В.

УДК 637.5.02

О.І. НЕКОЗ
Національний університет харчових технологій
О.В. БАТРАЧЕНКО, Н.В. ФІЛІМОНОВА
Черкаський державний технологічний університет

ОСОБЛИВОСТІ ГІДРОДИНАМІКИ М'ЯСНОЇ СИРОВИНИ ПРИ ЇЇ ПОДАЧІ ШНЕКОМ ВОВЧКА

В існуючих конструкціях вовчків наявний резерв збільшення продуктивності. За допомогою відеозйомки вперше встановлено закономірності інтенсивності подачі сировини по робочій площі решіток різального вузла. Сировина в кожен момент часу подається не по всій робочій площі решіток різального вузла, а лише в межах деякого сектору, величина якого залежить від конструктивних параметрів шнеку та від структурно-механічних властивостей сировини. Подача сировини є максимальною в зоні наближення кінця витка шнеку до різального вузла. В зонах різального вузла, які відповідають віддаленню поверхні останнього витка шнеку від приймальної решітки, подача суттєво знижується та врешті повністю зникає. Отримані дані можна використовувати при обґрунтуванні високопродуктивних способів подачі м'ясної сировини крізь різальний вузол вовчка, а також при розробці більш ефективного та більш дешевого різального інструменту вовчків.

Ключові слова: вовчок, шнек, м'ясо, подача, відеозйомка, питома продуктивність.

O. NEKOZ
National University of Food Technologies
O. BATRACHENKO, N. FILIMONOVA
Cherkassy State Technological University

PECULIARITIES OF HYDRODYNAMICS OF RAW MEAT IN ITS SUBMISSION MEAT GRINDERS SCREW

One of the most common types of technological equipment which is used in meat-processing industry, there are meat grinder. In modern conditions the further development of these machines is subject to the general market tendencies, i.e. in the directions of increasing the specific productivity and reduce operational costs for the purchase of the cutting tool. Growth relative productivity makes it possible to increase output without increasing capital and operating costs for the maintenance of process equipment. The authors ' analysis showing that existing designs of meat grinders available reserve of increase in productivity. Using the video for the first time the regularities of the flow rate of the raw material at the working space of lattices the cutting unit. The raw material is in every moment of time is not across the entire working area of the cutting grids of the node, but only within a certain sector, the value of which depends on the design parameters of the auger and from the structural-mechanical properties of raw materials. The supply of raw material is maximum in the zone of the approaching end of the coil auger to the cutting unit. In areas of the cutting unit, which correspond to the removal of the surface of the last turn of the screw from the suction grille, flow significantly decreases and finally completely disappears. The data obtained can be used in the justification of high-performance methods of feeding raw meat through the cutting assembly of the meat grinders, as well as in the development of more efficient and cheaper cutting tool grinders.

Keywords: meat grinder, auger, meat, feed, video, specific performance.

Постановка проблеми

Необхідною умовою успішного розвитку харчової промисловості є безупинне вдосконалення технологічного обладнання, з метою підвищення ефективності обробки сировини та зменшення експлуатаційних витрат. Одним із поширених видів технологічного обладнання, яке використовується в м'ясопереробній галузі, є вовчки. В сучасних умовах подальший розвиток цих машин підкоряється загальним тенденціям ринку, тобто йде в напрямках підвищення питомої продуктивності та зменшення експлуатаційних витрат на купівлю різального інструменту. Ріст питомої продуктивності дає можливість підвищити випуск продукції без збільшення капітальних та експлуатаційних витрат на утримання технологічного обладнання.

Проведений авторами аналіз та дослідження [1, 2] показали, що в існуючих конструкціях вовчків наявний резерв збільшення продуктивності. Так згідно відомим теоретичним уявленням, при визначенні продуктивності вовчків береться до уваги коефіцієнт, який знижує вирахуване значення на величину до 70%. У відомій літературі відсутні вичерпні відомості з пояснення природи даного коефіцієнту. На думку авторів, істотні розбіжності між дійсними та розрахованими значеннями продуктивності вовчка обумовлені особливістю подачі м'ясної сировини шнеком – сировина в кожен момент часу інтенсивно подається не по всій робочій площі решіток, а лише в межах деякого сектору з кутом менше за 180º, величина якого залежить від конструктивних параметрів шнеку та від структурно-механічних властивостей сировини. Подальше дослідження та належне врахування цього ефекту дасть змогу підвищити продуктивність вовчків без збільшення геометричних розмірів їх основних робочих органів.

Аналіз останніх джерел

У відомих працях, зокрема в [3–11], відсутні відомості з фіксації даного ефекту за допомогою відео- або фотозображень та зі встановлення характеру подачі м'ясної сировини шнеком вовчка. Актуальним є проведення таких досліджень.

Метою роботи є дослідження особливостей гідродинаміки м'ясної сировини при її русі крізь різальний вузол вовчка задля створення передумов для підвищення питомої продуктивності вовчків та зменшення експлуатаційних витрат на різальний інструмент.

Виклад основного матеріалу

Дослідження проводились за м'ясокомбінаті ТОВ "Черкаська продовольча компанія". Методика дослідження інтенсивності подачі сировини окремими зонами останнього витка шнеку полягала у виконанні відеозйомки процесу виходу м'ясної сировини із різального вузла вовчка при її подачі шнеком та у наступному аналізі отриманих зображень (рис. 1). Досліджувалась робота вовчків VVS-180, К6-ФВЗП-200, К6-ФВП-160.

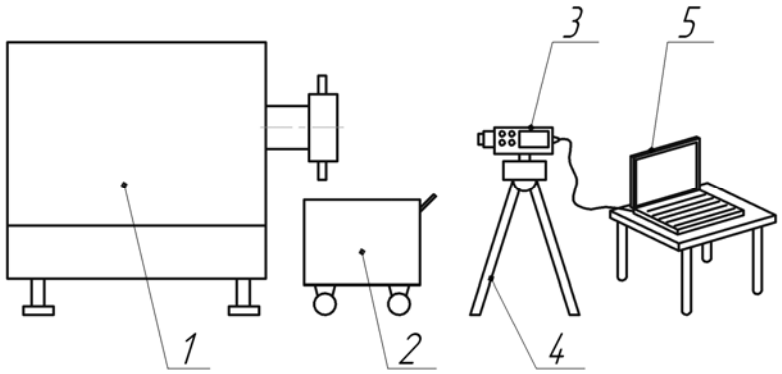


Рис. 1. Схема експериментальної установки для дослідження інтенсивності подачі сировини окремими зонами останнього витка шнеку: 1 - вовчок; 2 - візок для сировини; 3 - відеокамера; 4 - штатив; 5 - персональний комп'ютер.

При відеозйомці використовувалась цифрова відеокамера SONY Cyber-Shot DSC-S3000. Після зйомки отриманий відео-файл перетворювався на низку по-кадрових фотозображень за допомогою програмного пакету "Free Video to JPG Converter 5.0.99.823". Далі отримані фотозображення аналізувались і встановлювався характер подачі м'ясної сировини останнім витком шнеку вовчка.

В ході проведення досліджень встановлено характерні особливості інтенсивності подачі сировини останнім витком шнеку. Результати відеозйомки наведені на рис. 2–5. На них показано зміну положення сектору інтенсивної подачі сировини крізь різальний вузол вовчків, межі даного сектору окреслені зоною 1. На отриманих зображеннях сировина в даному секторі виглядає з гіршою різкістю в порівнянні з іншими зонами різального вузла через її рух під час процесу відезоймки.

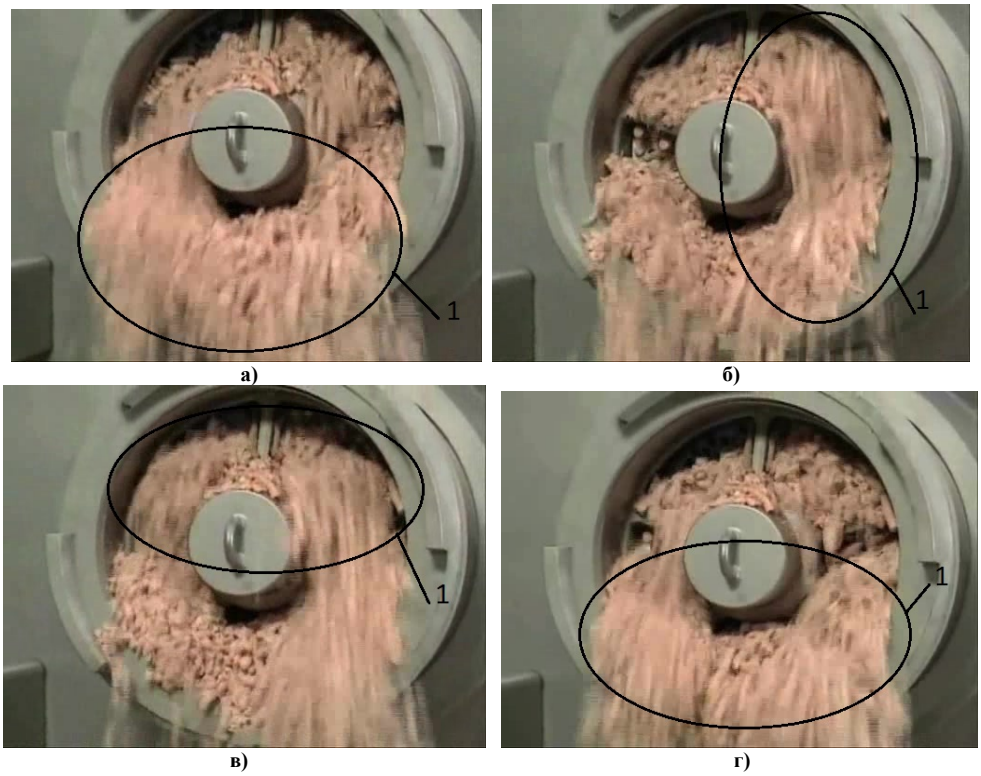
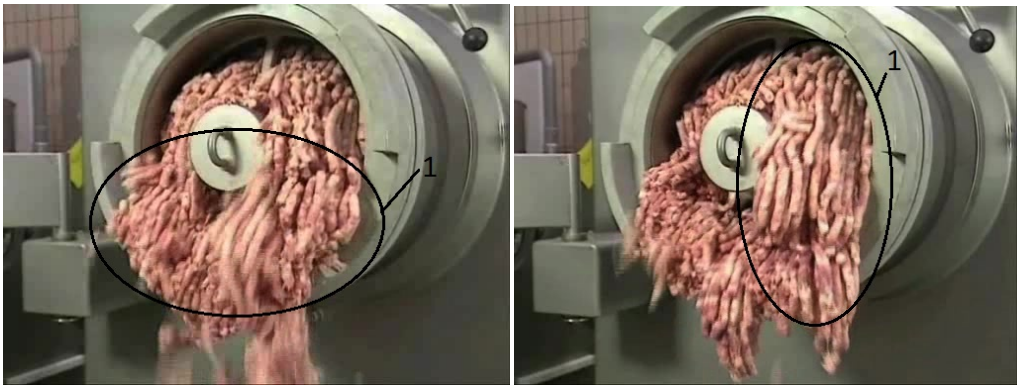
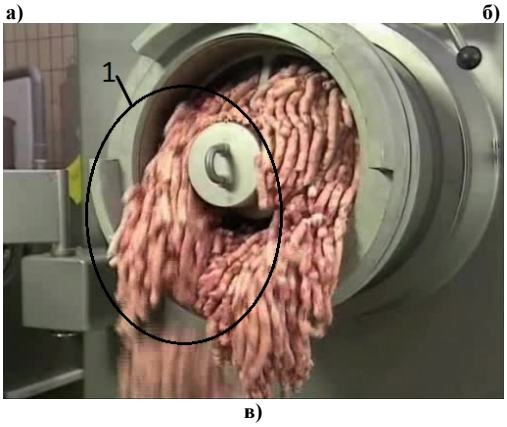


Рис. 2. Зміна положення зони інтенсивної подачі сировини 1 при обертанні шнеку вовчка проти годинникової стрілки (отримання м'ясного шроту із замороженої сировини)



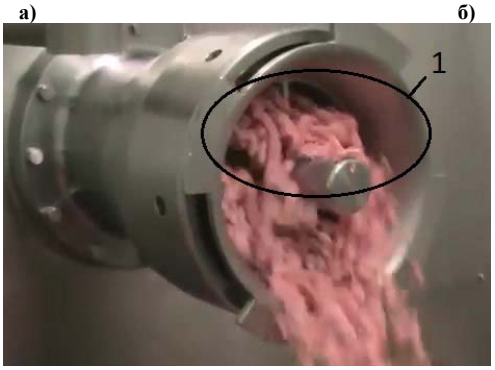
а) б)



в)

Рис. 3. Зміна положення зони інтенсивної подачі сировини 1 при обертанні шнеку вовчка проти годинникової стрілки (отримання м'ясного шроту з парної сировини, зовнішній діаметр решіток вовчка 200 мм)

а) б)



в)

Рис. 4. Зміна положення зони інтенсивної подачі сировини 1 при обертанні шнеку вовчка проти годинникової стрілки (отримання м'ясного шроту з парної сировини, зовнішній діаметр решіток вовчка 160 мм)

Рис. 5. Зміна положення зони інтенсивної подачі сировини 1 при обертанні шнеку вовчка проти годинникової стрілки (отримання м'ясного фаршу з парної сировини, зовнішній діаметр решіток вовчка 130 мм)

На рис. 2,б яскраво видно, що сировина подається лише в невеликій зоні вихідної решітки. На рис. 2–5 ці зони змінюються, але незмінним залишається локальність зони 1 подачі сировини крізь різальний вузол. Дана зона обертається разом зі шнеком вовчка проти годинникової стрілки. Аналогічна картина спостерігається при подрібненні сировини різного виду та на різних вовчках (рис. 2–5).

Спостереження за роботою вовчків [1] та аналіз отриманих відеоматеріалів дозволив встановити наступну особливість подачі м'ясної сировини крізь різальний вузол однозаходним шнеком: сировина в кожен момент часу подається не по всій робочій площі решіток різального вузла, а лише в межах деякого сектору, величина якого залежить від конструктивних параметрів шнеку та від структурно-механічних властивостей сировини. Схематично це показано на рис. 6 – подача сировини Q є максимальною в зоні наближення кінця витка шнеку до різального вузла. В зонах різального вузла, які відповідають віддаленню поверхні останнього витка шнеку від приймальної решітки, подача Q суттєво знижується та врешті повністю зникає. Означений сектор обертається разом зі шнеком вовчка.

Подача сировини крізь окремо взятий отвір вихідної решітки різального вузла є дискретною, а не постійною, як це вважалось за результатами попередніх досліджень. Достатньо висока частота обертання шнеку (близько 5 $с^{-1}$) створює уявлення про постійність такої подачі, але це не відповідає дійсності.

На рис. 7 наведено залежність величини кута інтенсивної подачі сировини β від основних конструктивних параметрів робочих органів вовчка. Як слідує з отриманих даних, при зменшенні діаметрів отворів вихідної решітки та при збільшенні кроку між витками шнеку величина кута β зменшується, що негативно впливає на питому продуктивність вовчка.

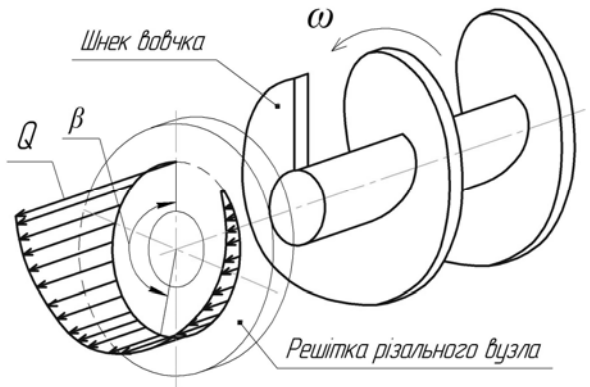


Рис. 6. Епюра інтенсивності подачі Q сировини останнім витком шнеку вовчка крізь різальний вузол

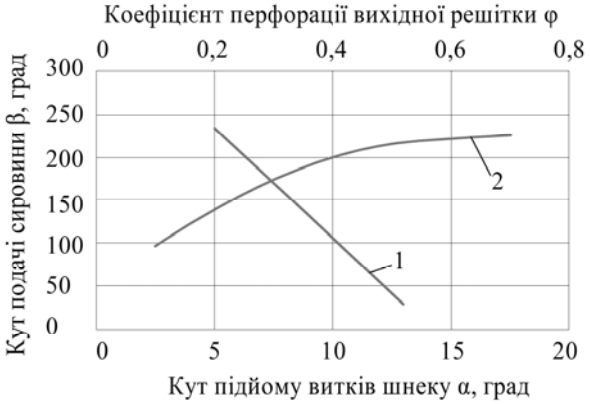


Рис. 7. Залежність кута подачі сировини β від конструктивних параметрів робочих органів вовчка

Отримані результати, як і [1], підтвердили гіпотезу авторів про недостатню питому продуктивність відомих моделей вовчків та про неоднакову ефективність роботи окремих лез ножів різального вузла

вовчків. На основі отриманих даних авторами розроблено рекомендації щодо раціонального використання різального інструменту вовчків, що дасть змогу м'ясопереробному підприємству заощадити на експлуатаційних витратах.

Висновки

Вперше на основі фіксації якісних показників руху сировини за допомогою відеозйомки встановлено закономірності гідродинаміки м'ясної сировини при її продавлювання крізь різальний вузол шнеком вовчка. Сировина в кожен момент часу подається не по всій робочій площі решіток різального вузла, а лише в межах деякого сектору, величина якого залежить від конструктивних параметрів шнеку та від структурно-механічних властивостей сировини. Подача сировини є максимальною в зоні наближення кінця витка шнеку до різального вузла. В зонах різального вузла, які відповідають віддаленню поверхні останнього витка шнеку від приймальної решітки, подача суттєво знижується та врешті повністю зникає. Отримані дані використано в ході обґрунтування високопродуктивних способів подачі м'ясної сировини крізь різальний вузол вовчка, а також при розробці більш ефективного та більш дешевого різального інструменту вовчків.

Література

1. Некоз О. І. Дослідження інтенсивності зношування лез ножа вовчка / [О. І. Некоз, Н. В. Філімонова, С. О. Філімонов та ін.] // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2013. – № 2. – С. 128–132.

2. Некоз О. І. Теоретичне визначення коефіцієнту продуктивності вовчка / О. І. Некоз, В. І. Осипенко, Н. В. Філімонова, О. В. Батраченко, С. О. Філімонов // Вісник Хмельницького національного університету. – 2015. – № 5. – С. 36 – 43.

3. Некоз С. О. Підвищення ефективності роботи і довговічності різального комплекту м'ясорізальних вовчків : дис. … кандидата техн. наук / С. О. Некоз. – Київ : УДУХТ, 2001. – 165 с.

4. Батраченко О. В. Підвищення ефективності роботи та довговічності м'ясорізальних машин : дис. .... кандидата техн. наук : 05.18.12 / Батраченко Олександр Вікторович. – Вінниця, 2014. – 284 с.

5. Вербицкий С. Б. Измельчение мясного сырья / С. Б. Вербицкий, В. В. Шевченко, А. В. Батраченко // Мясной бизнес. – 2010. – № 5. – С. 84–96.

6. Максимов Д. А. Конструкции режущих и подающих механизмов современных волчков / Д. А. Максимов, О. И. Якушев // Мясные технологии. – 2008. – № 10. – С. 14–17.

7. Haack E., Schnackel W., "Vom Rohstoff zum Feinbrät - ein Arbeitsgang - Trennsysteme zur Aufwertung stofflicher Eigenschaften von Fleisch - Teil 2", Fleischwirtschaft, № 4, 2008, pp. 75–80.

8. Haack E., Schnackel W., "From meat to emulsion - a single operation - Separation systems for upgrading material properties of meat - Part 2", Fleischwirtschaft International, № 5, 2008, pp. 23–28.

9. Haack E., Schnackel W., Krickmeier J., „Wirkungsgrade deutlich verbessern", Fleischwirtschaft, № 6, 2012 pp. 25–33.

10. Schnackel W., „Energieersparnis durch inelligente technik", Fleischwirtschaft, № 7, 2013 pp. 24–30.

11. Schnackel W., Krickmeier J., Pongjanyanukul W., Dmitrinka Schnackel, I. Micklisch, Oliver Haack, „Untersuchungen zur optimierung des wolfprozesses. Teil 4", Fleischwirtschaft, № 7, 2012. pp. 91–96.

References

1. Doslidzhennya intensy`vnosti znoshuvannya lez nozha vovchka / [O. I. Nekoz, N. V. Filimonova, S. O. Filimonov ta in.] // Visny`k Cherkas`kogo derzhavnogo texnologichnogo universy`tetu. – 2013. – № 2. – S. 128–132.

2. Teorety`chne vy`znachennya koeficiyentu produkty`vnosti vovchka / V. I. Osy`penko, N. V. Filimonova, O. V. Batrachenko, S. O. Filimonov // Visny`k Xmel`ny`cz`kogo nacional`nogo universy`tetu. – 2015. – № 5. – S. 36 – 43.

3. Nekoz S. O. Pidvy`shhennya efekty`vnosti roboty` i dovgovichnosti rizal`nogo komplektu m'yasorizal`ny`x vovchkiv: dy`s…. kandy`data texn. nauk. / S. O. Nekoz – Ky`yiv: UDUXT, 2001. – 165 s.

4. Batrachenko, O. V. Pidvy`shhennya efekty`vnosti roboty` ta dovgovichnosti m'yasorizal`ny`x mashy`n: dy`s.... kandy`data texn. nauk: 05.18.12 / Batrachenko Oleksandr Viktorovy`ch. – Vinny`cya, 2014. – 284 s.

5. Verby`czky`j S. B. Y`zmel`cheny`e myasnogo syr`ya / S. B. Verby`czky`j, V. V. Shevchenko, A. V. Batrachenko // Myasnoj by`znes. – 2010. - №5. – S.84-96.

6. Maksy`mov D. A. Konstrukcy`y` rezhushhy`x y` podayushhy`x mexany`zmov sovremennyh volchkov / D. A. Maksy`mov, O. Y`. Yakushev // Myasnye texnology`y`. – 2008. - 310. – S. 14-17.

7. Haack E., Schnackel W., "Vom Rohstoff zum Feinbrät - ein Arbeitsgang - Trennsysteme zur Aufwertung stofflicher Eigenschaften von Fleisch - Teil 2", Fleischwirtschaft, № 4, 2008, pp. 75–80.

8. Haack E., Schnackel W., "From meat to emulsion - a single operation - Separation systems for upgrading material properties of meat - Part 2", Fleischwirtschaft International, № 5, 2008, pp. 23–28.

9. Haack E., Schnackel W., Krickmeier J., „Wirkungsgrade deutlich verbessern", Fleischwirtschaft, № 6, 2012 pp. 25–33.

10. Schnackel W., „Energieersparnis durch inelligente technik", Fleischwirtschaft, № 7, 2013 pp. 24–30.

11. Schnackel W., Krickmeier J., Pongjanyanukul W., Dmitrinka Schnackel, I. Micklisch, Oliver Haack, „Untersuchungen zur optimierung des wolfprozesses. Teil 4", Fleischwirtschaft, № 7, 2012. pp. 91–96.

Рецензія/Peer review : 11.11.2017 р. Надрукована/Printed :10.12.2017 р.
Рецензент: к. т. н., доц. Л. М. Мізнік

УДК 681.5.034.3

П.С. МАЙДАН, Г.Ф. ВОРОНІН, Е.О. ЗОЛОТЕНКО, А.В. БУРЯК
Хмельницький національний університет

ОЦІНКА СТІЙКОСТІ ЗАМКНУТОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ЧАСТОТНИХ КРИТЕРІЇВ

В роботі представлено результати оцінки стійкості системи автоматичного регулювання (САР) шафи холодильника за допомогою частотних критеріїв Михайлова та Найквіста. Стійкість системи є необхідною умовою можливості САР вирішувати поставлені перед нею завдання. Оцінка стійкості системи за даними критеріями виконується на основі характеристики, тобто побудови годографа. Розглянуто розв'язання поставленої задачі з використанням різних програмних середовищ, таких як LabVIEW, MathCad, MatLab.

Ключові слова: частотні критерії, годограф, Михайлов, Найквіст, LabVIEW, MathCad, MatLab.

P.S. MAIDAN, G.F. VORONIN, E.O. ZOLOTENKO, A.V. BURYAK
Khmelnytskiy National University

EVALUATION OF THE STABILITY OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM BY FREQUENCY CRITERIA

The paper presents the results of the evaluation of the stability of the automatic control system (ACS) of the refrigerator cabin using the frequency criteria of Mikhailov and Nyquist. Stability of the system is a prerequisite for the ability of the ACS to solve its tasks. The evaluation of the stability of the system according to the criteria is performed on the basis of the characteristic, that is, the construction of the hodograph. Solving the problem using a variety of software environments such as LabVIEW, MathCad, MatLab is considered. The availability of mathematical packages enables the use of PCs for the construction of hodographs, including the Mikhailov and Nyukvist hodographs. The MathCAD software package has built-in functions that will allow us to perform the necessary calculations and decompose the equation into real and imaginary parts. In the LabVIEW program environment, the program is a cyclic block with a limited number of iterations (calculated from the Nyquist criterion frequency and step), and separately the numerator and denominator coefficients in the form of a one-dimensional array of data, which, in turn, are calculated according to the formulas given in the elements of the calculation. Elements of the calculation are standard subprograms of polynomial calculations, in which numbers are considered in the complex form and after mathematical actions are decomposed into real and imaginary parts, after which according to the coefficients of the actual and imaginary part a graph is drawn on the front panel. In the Matlab software environment, there are necessary built-in functions for calculating the Nyquist criterion, but to find the Mikhailov criteria, the program needs to be written completely from scratch. The analysis of ACS in various ways has shown that the use of software environments such as LabVIEW, MathCad, and Matlab increases the accuracy of system stability determination. However, it requires not only to know the basics of programming to write the necessary file-programs, but also to have basic knowledge of the theory of automatic control, in order to bring the equation of the transfer function of the ACS to the desired type of program.

Key words: frequency criteria, hodograph, Mikhailov, Nyquist, LabVIEW, MathCad, MatLab.

Вступ

Під стійкістю систем автоматичного регулювання (САР) в загальному випадку розуміють [1, 2] її властивість повертатися в початкове (або близьке до того) положення після зникнення дії факторів (збуджень), які вивели систему із стану початкової рівноваги. Стійкість системи є необхідною умовою здатності САР вирішувати поставлені перед нею завдання.

Відомо [1–3], що при виведенні рівняння замкнутої САР в багатьох випадках використовується лінеаризація нелінійних залежностей за допомогою ряду Тейлора. Виведене таким чином рівняння називається рівнянням першого наближення.

При $n > 4$ немає аналітичного розв'язку характеристичного рівняння. Знаходити корені при більш високих порядках важко, тому було розроблено методи аналізу стійкості з критеріїв без знаходження коренів.

Існують два основних види критеріїв стійкості: алгебраїчні та частотні.

Аналіз останніх джерел

До частотних критеріїв стійкості САР відносять: Михайлова, Найквіста, метод D-розбиття та інші.

Критерій Михайлова був запропонований в 1938 році і є дуже зручним для аналізу лінійних систем, особливо високого порядку $(n \geq 5)$.

Оцінка стійкості системи за даним критерієм виконується на основі характеристики або годографу Михайлова, яка будується наступним чином:

В поліномі характеристичного рівняння замкнутої системи:

$$a_0 \cdot p^n + a_1 \cdot p^{n-1} + \ldots + a_{n-1} \cdot p + a_n = L(p) \quad (1)$$

виконують підстановку $p = j \cdot \omega$, після чого вираз годографа Михайлова отримують у вигляді: $L(j\omega) = a_0 (j\omega)^n + a_1 (j\omega)^{n-1} + \ldots + a_{n-1}(j\omega) + a_n$.

Вираз $L(j\omega)$ ділять на дві частини – дійсну $A(\omega)$ і уявну $jB(\omega)$, тобто:

$$L(j\omega) = A(\omega) + jB(\omega), \quad (2)$$

де $A(\omega) = a_n - a_{n-2}\omega^2 + a_{n-4}\omega^4 - a_{n-6}\omega^8 + \ldots$;

$$B(\omega) = a_{n-1}\omega - a_{n-3}\omega^3 + a_{n-5}\omega^5 - \dots .$$

Задаючи значення ω в межах від 0 до $+\infty$ на комплексній площині в координатах $A(\omega)$, $jB(\omega)$ будують годограф Михайлова, радіус-вектор $L(j\omega)$ якого при зміні ω від 0 до $+\infty$ обертається проти годинникової стрілки.

Оцінка стійкості здійснюється за виглядом і розміщенням кривої $L(j\omega)$ відносно квадрантів площини $A(\omega) - jB(\omega)$ (рис. 1).

Формула критерію: для стійкості замкнутої системи необхідно і достатньо, щоб годограф почавши обертання з точки, яка лежить на дійсній вісі праворуч від нуля, обертаючись проти годинникової стрілки і ніде не перетворюючись в нуль, пройшов послідовно n квадрантів комплексної площини, повернувшись на кут $\frac{\pi}{2} \cdot n$ [1].

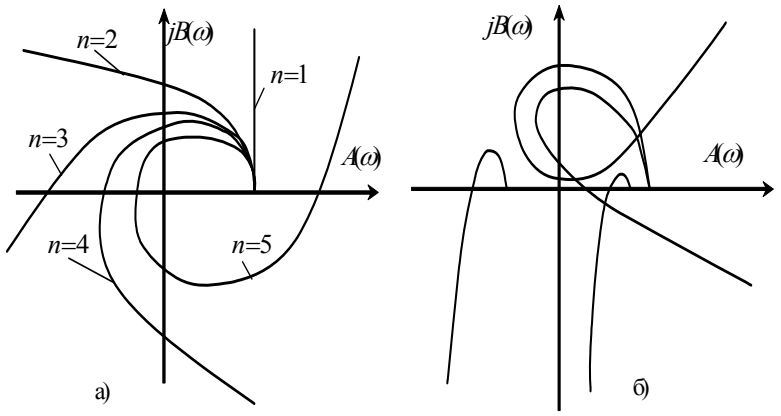


Рис. 1. Приклади годографа Михайлова для стійких (а) та нестійких (б) систем

Американський вчений розробив критерій стійкості для дослідження електронних підсилювачів зі зворотним зв'язком. Особливість критерію Найквіста в тому, що він дає змогу:

- оцінювати динамічні властивості замкнутих систем за частотними характеристиками відповідних розімкнутих систем;
- досліджувати динамічні властивості замкнутої системи за відсутності рівнянь динаміки системи або її окремих елементів.

У цьому разі достатньо мати експериментальні частотні характеристики системи або відповідних ланок, які можуть бути визначені на реальних елементах системи або на їхніх моделях [1, 2].

Формула критерію [2]: для стійкості замкнутої лінійної САР необхідно і достатньо, щоб при русі точки N вздовж амплітудно-фазової частотної характеристики розімкнутої системи при зміні ω від 0 до $+\infty$ вектор CN, початок якого лежить у точці С з координатами (-1, *j*0), повернувся на кут:

$$\varphi_{CN} = (n - n_1 + 2m)\frac{\pi}{2}, \tag{3}$$

де n, n_1 – відповідно степені характеристичних рівнянь замкнутої і розімкнутої систем;

m – кількість додатних коренів у характеристичному рівнянні розімкнутої системи.

На практиці, як правило, $n = n_1$, і тому при $m = 0$ умова стійкості замкнутої системи матиме вигляд $\varphi_{CN} = 0$ [1].

На рис. 2 показано АФХ двох систем у розімкнутому стані, які після замикання будуть стійкою (крива 1) та нестійкою (крива 2).

При наявності k нульових коренів у характеристичному рівнянні розімкнутої системи початкова точка АФХ з $\omega = 0$ не лежить на правій половині дійсної вісі. Тому для застосування критерію Найквіста АФХ в цьому випадку доповнюється дугою нескінченно великого радіуса-вектора кута $\pi/2 \cdot k$ (рис. 3) [1–3].

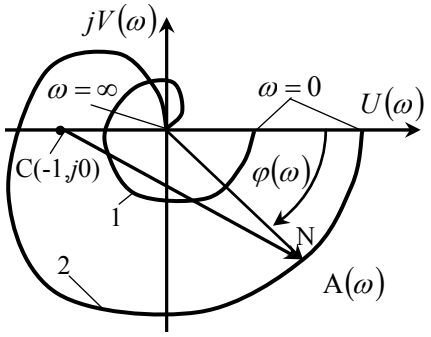


Рис. 2. АФХ стійкої (1) та нестійкої (2) замкнутих систем у розімкнутому стані

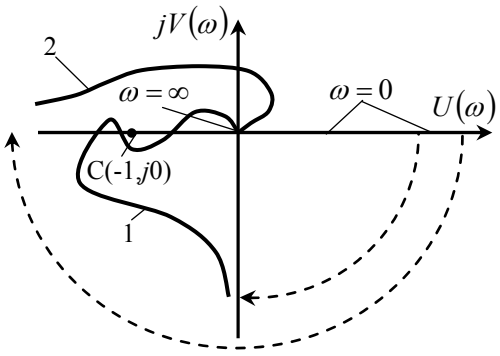


Рис. 3. АФХ стійкої (1) та нестійкої (2) замкнутих систем у розімкнутому стані при одному (1) та двох (2) нульових коренях характеристичного рівняння розімкнутого стану

Виклад основного матеріалу

В якості прикладу для оцінки стійкості обираємо САР шафи холодильника.

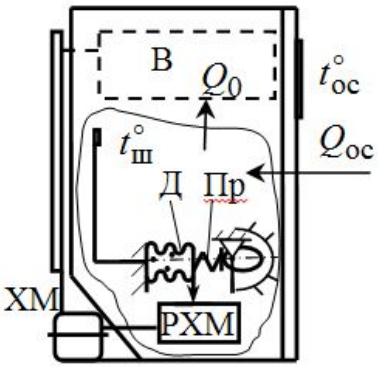


Рис. 4. Конструктивна схема САК температурою в шафі холодильника

Герметична шафа (рис.4) побутового холодильника охолоджується випарником (В) холодильної машини (ХМ), який забирає тепло з шафи потужністю Q_0 . Тепло з'являється в шафі переважно за рахунок теплового потоку $Q_{ос}$ ззовні всередину через стінки шафи. В сталому режимі кількість тепла, що заходить з кімнати в шафу за одиницю часу буде дорівнювати кількості тепла, яке відбирається холодильною машиною з шафи за одиницю часу. При зміні зовнішньої температури $t^\circ_{ос}$ температура $t^\circ_{ш}$ в шафі буде мінятися, чого не повинно бути.

В САР температурою всередині шафи використовується пневматичний датчик (Д) температури. Тиск пари в ньому прямо пропорційний температурі повітря всередині шафи. Тиск пари датчика створює силу натискання на порівнювальний елемент, на який в протилежному напрямку діє пружина (Пр). Зміщення порівнювального елементу механічно підсилюється і змінює пропорційно холодопродуктивність холодильної машини через регулятор (РХМ) (насправді в побутових машинах частіше використовується релейна залежність холодопродуктивності від зміщення порівнювального елементу, однак релейні САК відносяться до нелінійних систем і аналіз їх більш складний) [4].

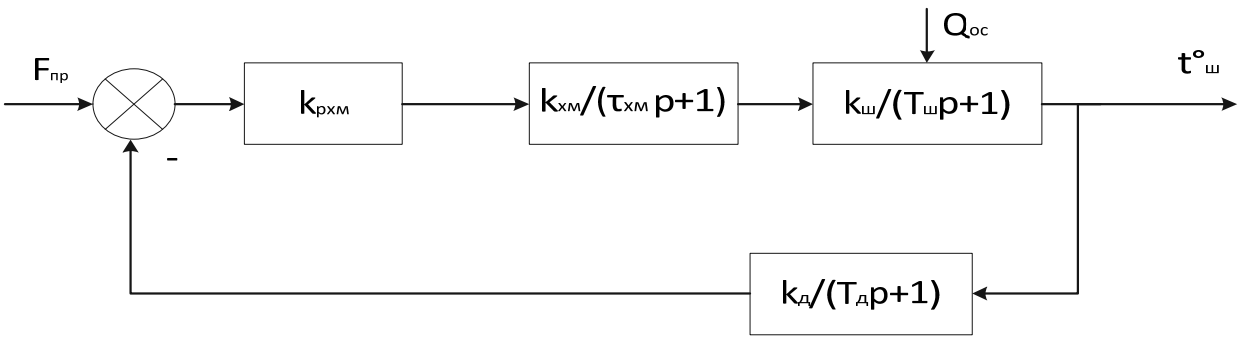


Рис. 5. Структурна схема САР шафи холодильника

САР описується наступним рівнянням:

$$W(p)=\frac{k_p}{(\tau_{хм}\cdot p+1)\cdot(T_ш\cdot p+1)\cdot(T_д\cdot p+1)}, \quad (4)$$

де $\tau_{хм}$ – час запізнення спрацювання холодильної машини, $\tau_{хм}=0,004[c]$;

$T_ш$ – стала часу шафи, $T_ш=0,01[c]$;

$T_д$ – стала часу пневмодатчика, $T_д=0,003[c]$;

k_p – коефіцієнт передачі розімкнутої системи, $k_p=350$ [4].

Використаємо декілька способів оцінки стійкості САР шафи холодильника за наведеними вище критеріями Михайлова та Найквіста.

1. Спосіб «ручний» [4]

Для подальшого обрахунку нам необхідний лише знаменник рівняння (4), який ми змінюємо до вигляду:

$$L(p)=(\tau_{хм}\cdot p+1)\cdot(T_ш\cdot p+1)\cdot(T_д\cdot p+1)+k_p \quad (5)$$

Виконуємо підстановку значень в рівняння та заміну $p\to j\cdot\omega$.

$$L(j\omega)=0,00000012(j\omega)^3+0,000082(j\omega)^2+0,017(j\omega)+351. \quad (6)$$

Згідно рівняння (2) виконуємо розподіл рівняння (6) на дійсну та уявну частину

$$L(j\omega)=(351-0,000082\omega^2)+j(0,017\omega-0,00000012\omega^3).$$

При $\omega=0$ поліном прийме значення 351. Це означає, що при $\omega=0$ початкова точка годографа Михайлова лежить на дійсній вісі у точці із значенням 351. Крім того точка годографа буде лежати на дійсної вісі і при значенні $\omega=\sqrt{0,017/0,00000012}=376,4$ і її абсциса буде дорівнювати $351-0,000082\cdot 376,4^2=339,4$. При $\omega=\sqrt{351/0,000082}=2069$ дійсна частина дорівнює нулю і точка годографа займе місце на уявній вісі з ординатою $0,017\cdot 2069-0,00000012\cdot 2069^3=-1027,6$. Збільшення частоти призведе до від'ємної дійсної частини та від'ємної уявної частини. Всі ці розрахунки остаточно оформлено у вигляді годографа Михайлова на рис.6.

Перевіримо необхідні і достатні умови стійкості за годографом Михайлова. По-перше, початок годографа – точка на дійсній вісі праворуч від нуля з координатами (350,0) – співпадає з першою вимогою критерію. По-друге, годограф обертається проти годинникової стрілки, що і потрібно. По-третє, годограф не проходить через точку (0,0), що також необхідно для стійкості системи. Номери квадрантів, які послідовно проходить годограф – 1 і 4, ці номери – не послідовні. Вимоги до вигляду годографа Михайлова щодо стійкої САР не задовольняються і вся система при таких значеннях параметрів буде не стійкою.

Критерій Найквіста застосуємо до АФХ розімкнутої системи на рис.5. Характеристичне рівняння розімкнутої системи має один нульовий корінь. Тому АФХ розімкнутої системи при $\omega=0$ має $A=\infty$, $\varphi=-\pi/2$. Доповнюємо АФХ дугою $\pi/2$ як на рис. 3 і оцінюємо кут повороту вектора CN із зміною ω від 0 до ∞. Він складе в нашому випадку 180^0 або π. Цей кут не дорівнює нулю, і з критерію Найквіста замкнута система буде нестійкою.

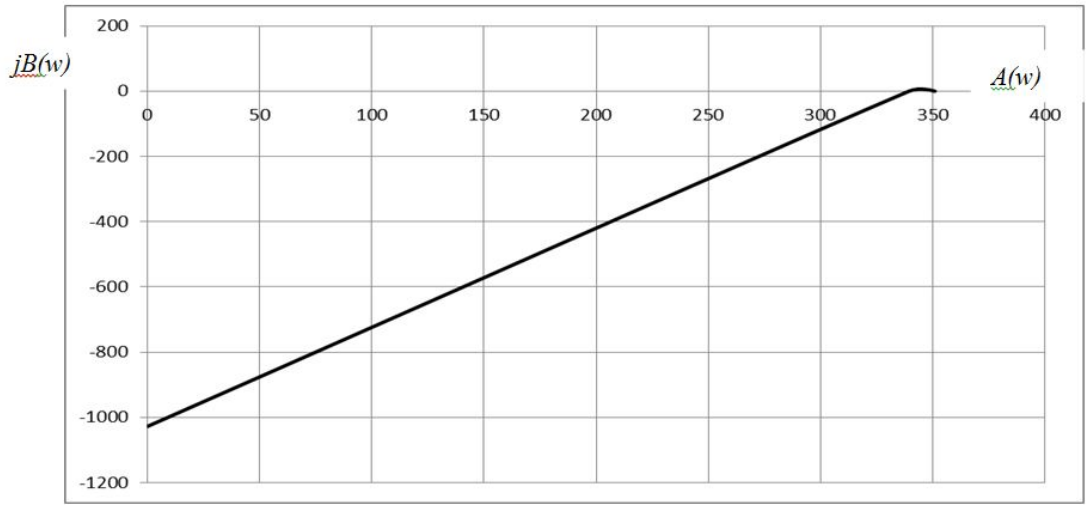


Рис. 6. Годограф Михайлова

2. Спосіб автоматизований

Наявність математичних пакетів дає можливість використати ПК для побудови годографів, у тому

числі і годографів Михайлова та Найквіста.

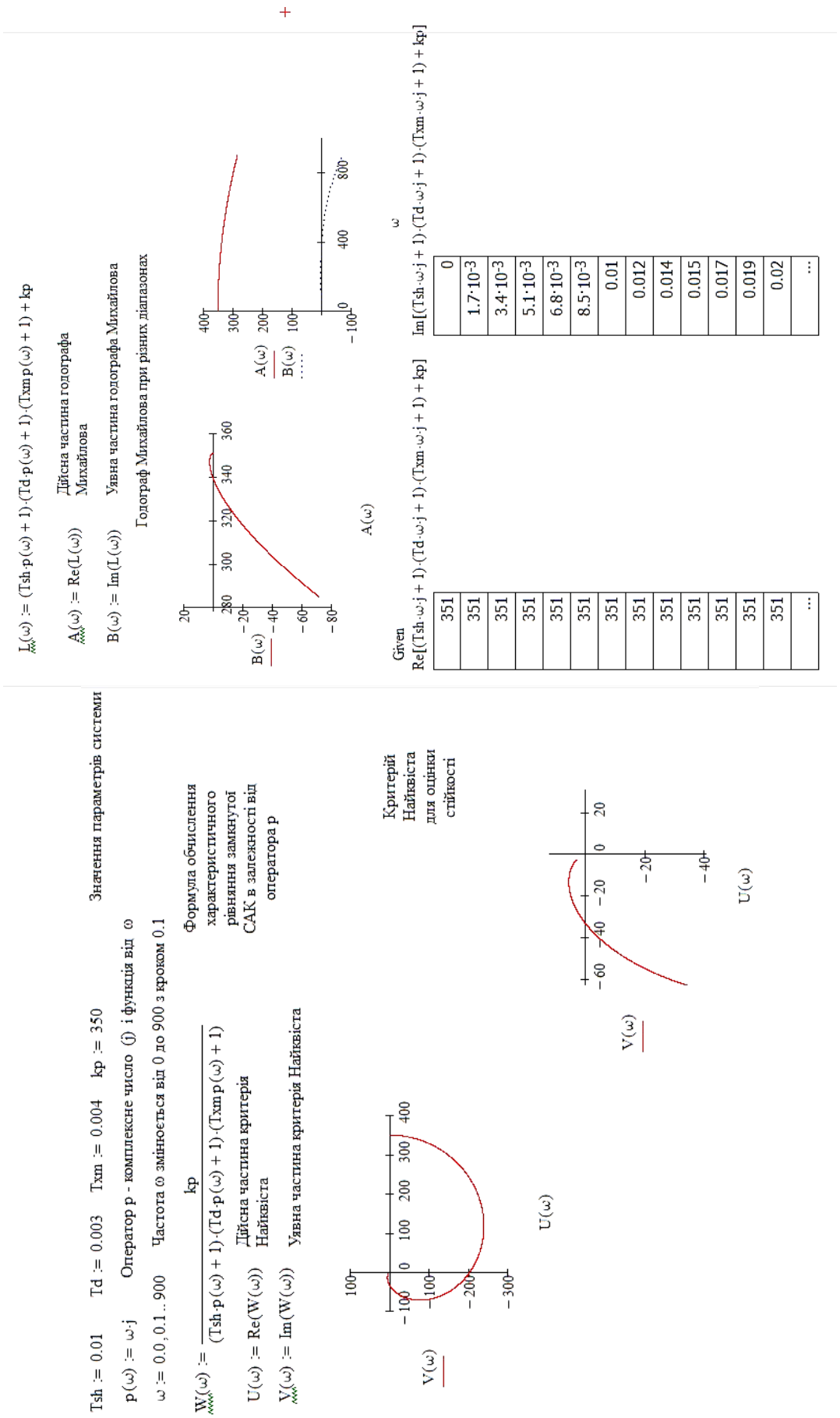


Рис. 7. Файл Mathcad для побудови годографа Михайлова та критерія Найквіста

2.1 З використанням програмного продукту MathCad [4]

Як приклад на рис. 7 наведено побудову такого годографа, з визначенням дійсної (Re) та уявної (Im) частин годографа Михайлова.

Система не стійка так як не виконуються умови стійкості, годограф обертається проти годинникової стрілки, але не проходить послідовно *n* квадрантів.

Критерій Найквіста застосуємо до АФХ розімкнутої системи на рис. 7. Характеристичне рівняння розімкнутої системи має один нульовий корінь. Тому АФХ розімкнутої системи при $\omega = 0$ має $A = \infty$, $\varphi = -\pi/2$. Доповнюємо АФХ дугою $\pi/2$ як на рис.7 і оцінюємо кут повороту вектора CN із зміною ω від 0 до ∞. Він складе в нашому випадку 180 або π. Цей кут не дорівнює нулю, годограф охоплює точку {-1; *j*0} на комплексній площині, тому і з критерію Найквіста замкнута система буде нестійкою.

2.2 З використанням програмного середовища LabVIEW [5]

Для перевірки стійкості системи по критерію Найквіста напишемо програму в середовищі LabVIEW та використаємо наступне рівняння:

$$W^{Q_{oc}}(p) = \frac{k_ш(T_д \cdot p + 1) \cdot (\tau_{хм} \cdot p + 1)}{[(\tau_{хм} \cdot p + 1) \cdot (T_ш \cdot p + 1) \cdot (T_д \cdot p + 1)] + k_p}, \quad (7)$$

де $k_ш$ – коефіцієнт передачі шафи, $k_ш = 0,7\left[град/Вт\right]$ [4].

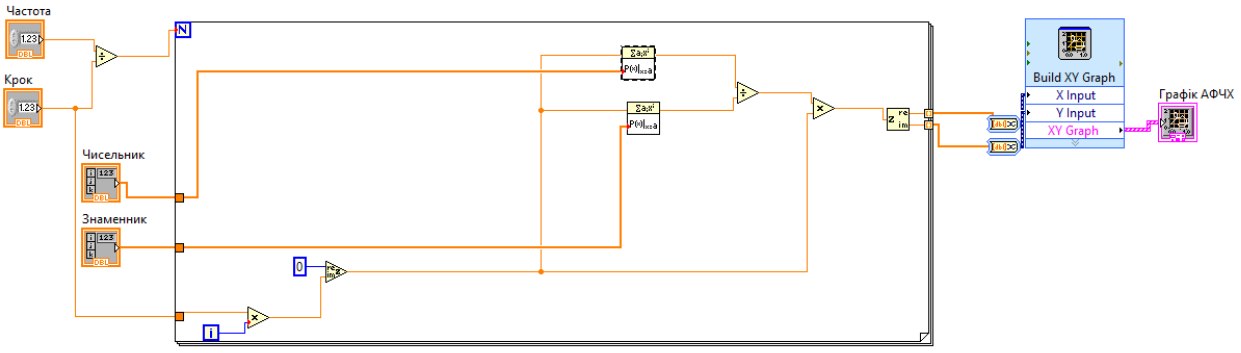


Рис. 8. Блок-схема програми для обрахунку стійкості САР

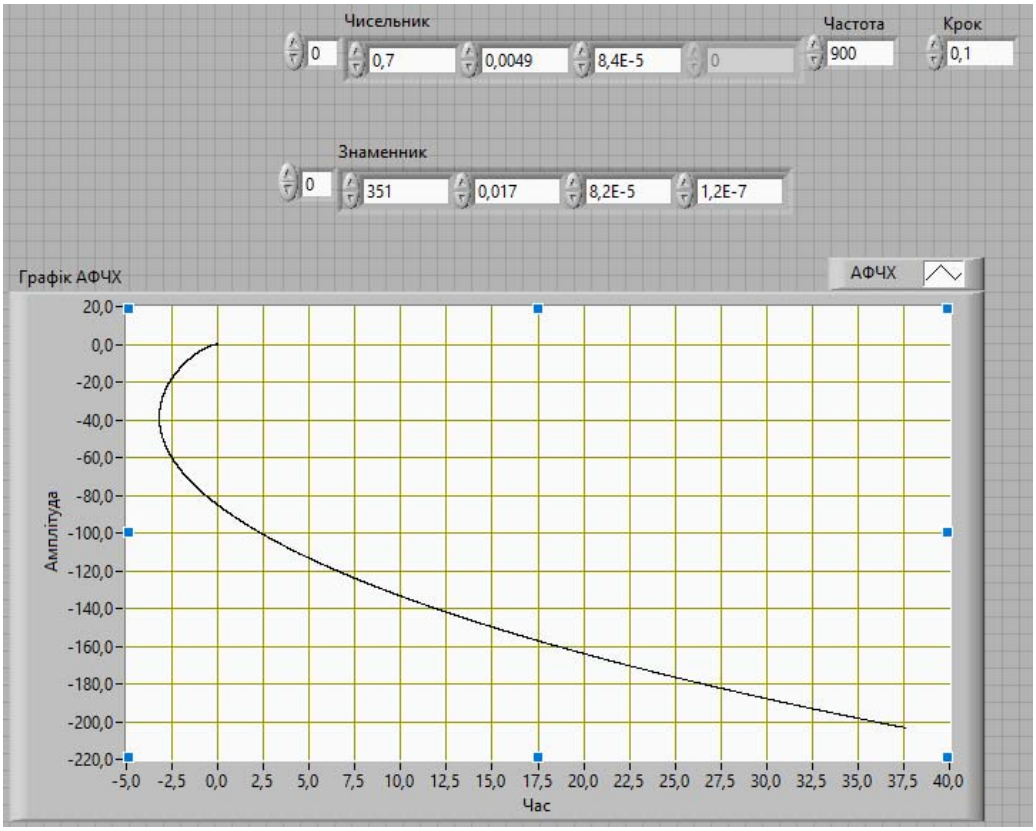


Рис. 9. Передня панель програми для обрахунку стійкості

Програма представляє собою циклічний блок з обмеженою кількістю ітерацій (яка вираховується з

показників критерію Найквіста частотою та кроком) та окремо коефіцієнти чисельника та знаменника у вигляді одномірного масиву даних, котрі, в свою чергу, обраховуються за заданими в елементах обрахунку формулами. Елементи обрахунку представляють собою стандартні підпрограми поліноміальних обрахунків, в яких числа розглядаються в комплексному вигляді та після математичних дій розкладаються на дійсну та уявну частини, після чого по коефіцієнтам дійсної та уявної частини будується графік, що виводиться на лицьову панель.

АФЧХ розімкнутої системи обертається проти годинникової стрілки та не охоплює точку {-1; *j*0} на комплексній площині. Отже, замкнута система стійка.

2.3 З використанням програмного середовища MatLab [6]

Для одержання АФЧХ конкретної САР слід використовувати можливості програмування файлу-сценарію. Відповідний скрипт для файлу САР матиме наступний вигляд:

```
% Введення передаточних функцій блоків
W1=tf([0.000084 0.0049 0.7], [0.00000012 0.000082 0.017 351])
% Передаточна функція САР по задаючому впливу у мінімальній реалізації
Wekv= minreal(W1)
% Приведення передаточної функції до стандартної форми запису
[cisl,znam]=tfdata(Wekv,'v'); n=length(znam);
Wekv=tf(cisl/znam(n),znam/znam(n))
% Одержання значень W(jw) у вигляді одномірного масиву при зміні частоти від 0.1 до 900 рад/с
w=linspace(0.1,900,400000); W=freqresp(Wekv,w); W=W(:);
% Побудова осей координат і АФЧХ із анімацією
plot(real(W),imag(W),'w'); xlabel('P(w)'); ylabel('jq(w)'); title('АФЧХ');
dx=1.1; x1=dx*min(real(W)); x2=dx*max(real(W)); y1=dx*min(imag(W));
y2=50;
line([x1 x2],[0 0],'Color','k','Linewidth',2); line([0 0],[y1 y2],'Color','k','Linewidth',2)
grid on; hold on; comet(real(W),imag(W),0);
plot(real(W),imag(W),'b','Linewidth',3)

Transfer function:
      8.4e-005 s^2 + 0.0049 s + 0.7
-----------------------------------------
1.2e-007 s^3 + 8.2e-005 s^2 + 0.017 s + 351

Transfer function:
   700 s^2 + 4.083e004 s + 5.833e006
-----------------------------------------
s^3 + 683.3 s^2 + 1.417e005 s + 2.925e009

Transfer function:
    2.393e-007 s^2 + 1.396e-005 s + 0.001994
-----------------------------------------------------
3.419e-010 s^3 + 2.336e-007 s^2 + 4.843e-005 s + 1
```

Тут функція *ω=linspace(a,b,n)* формує лінійний масив рівновіддалених значень частоти розміру *1×n* , початковим і кінцевим елементами якого є точки *a* і *b*. Функція *W=freqresp(sys,w)* формує на сітці частот *ω* тримірний масив значень функції комплексної змінної *W*(*jω*). Це пов'язане з тим, що вона застосовна і для багатомірних моделей (з декількома входами і виходами), *W*(*jω*) яких представляє собою матрицю. Перші два індекси позначають рядок і стовпець у цій матриці, а третій – номер точки АФЧХ. Для системи з одним входом і одним виходом зручно перетворити тримірний масив в одномірний командою *W=W(:).* Функція *comet* служить для анімації представлення результатів розрахунків. Результуюча АФЧХ матиме вигляд, наведений на рис. 10.

АФЧХ замкнутої системи обертається проти годинникової стрілки та не охоплює точку {-1; *j*0} на комплексній площині. Отже, замкнута система стійка.

Використавши рівняння (7) та розбивши його на дійсну та уявну частини отримаємо:

$$P(j\omega) = 0,000082\omega^2 + 351$$

$$Q(j\omega) = 0,00000012\omega^3 + 0,017\omega$$

Використовуючи вбудовану функцію plot() в MatLab побудуємо годограф Михайлова та визначимо стійкість системи:

```
k = 351;
```

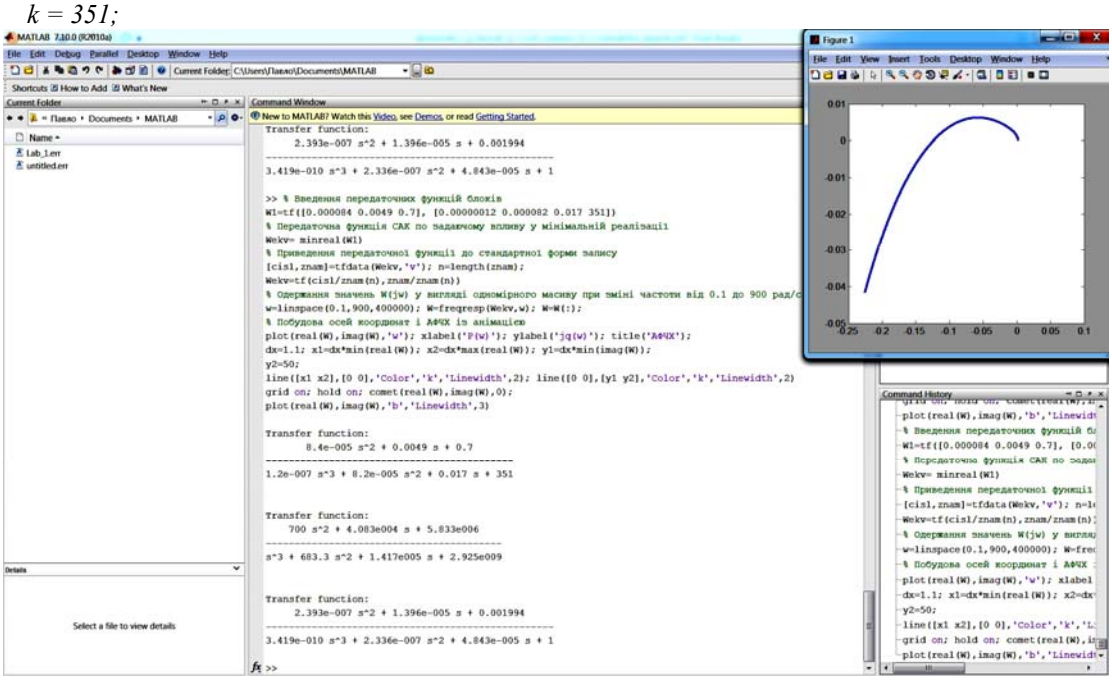


Рис. 10. АФЧХ САР, отримана після виконання файлу-сценарію

```
a1 = 0.00000012;
a2 = 0.000082;
a3 = 0.017;

for w=0:0.01:900,
    Njw= a1*((w*i)^3) + a2*((w*i)^2) + a3*(w*i) + k;
    Re = real(Njw);
    Im = imag(Njw);
    plot(Re, Im, 'x')
    hold on
end
hold off
grid on
axis([-20 360 -80 120])
```

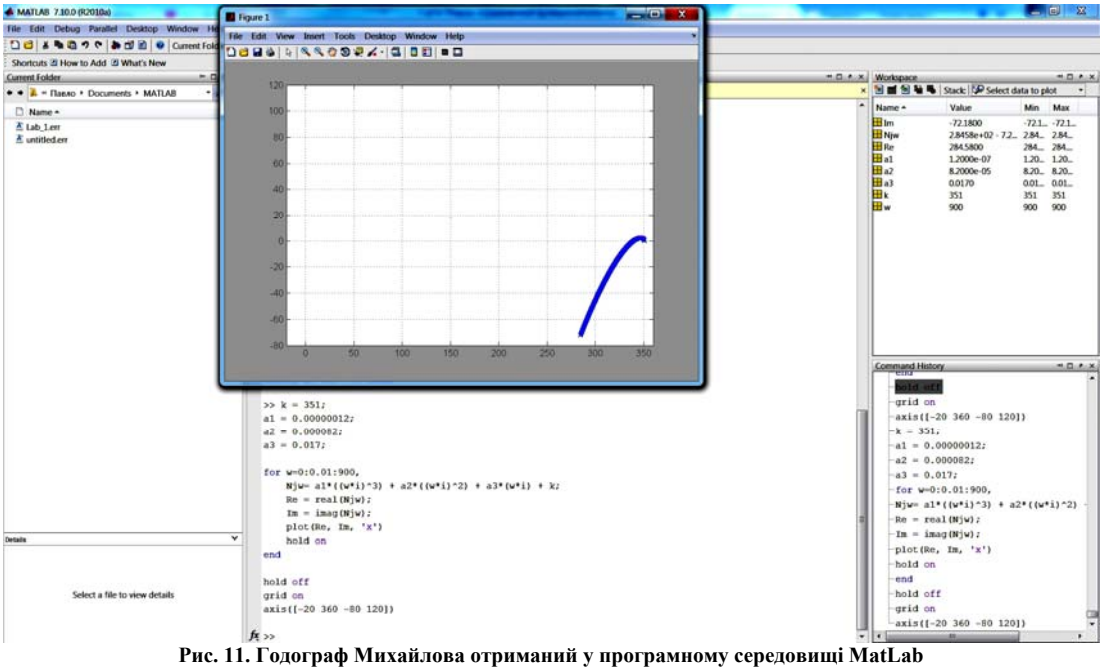


Рис. 11. Годограф Михайлова отриманий у програмному середовищі MatLab

Система не стійка так як не виконуються умови стійкості, годограф обертається проти годинникової стрілки, але не проходить послідовно *n* квадрантів.

Висновки

Найпростішим, на наш погляд, є користування програмним продуктом MathCad, для якого необхідно знати лише передавальну функцію розімкнутої САР та значення коефіцієнтів. За допомогою вбудованих функції програмний продукт MathCad самостійно знайде уявну та дійсну частини рівняння та побудує необхідні нам графічні залежності.

При використанні програмного середовища LabVIEW треба мати навички роботи з побудови блок-схем та користування циклами та математичними функціями, крім того запис коефіцієнтів потрібно виконувати в оберненому порядку. Визначити стійкість за критерієм Михайлова неможна через відсутність вбудованих функцій в програмному середовищі.

В програмному середовищі Matlab є необхідні вбудовані функції для обрахунку критерію Найквіста, але для знаходження критерію Михайлова програму необхідно писати повністю з нуля.

Аналіз САР різними способами показав, що використання програмних середовищ, типу LabVIEW, MathCad, Matlab, підвищує точність визначення стійкості систем. Проте вимагає не тільки знати основи програмування для написання необхідних файл-програм, але і володіти базовими знання із теорії автоматичного керування для того, щоб привести рівняння передавальної функції САР до необхідного програмі виду.

Література

1. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування / Попович М.Г., Ковальчук О.В. – К. : Либідь, 1997. – 544 с.

2. Власов К.П. Теория автоматического управления : учебное пособие / Власов К.П. – Х. : Изд-во Гуманитарный центр, 2007. – 526 с.

3. Теорія автоматичного керування : конспект лекцій для студентів спеціальності „Обладнання легкої промисловості та побутового обслуговування” / Г.Ф. Воронін. – Хмельницький : ТУП, 2002. – 50 с.

4. Теорія автоматичного керування : лабораторний практикум для студентів спеціальностей „Обладнання легкої промисловості та побутового обслуговування” і „Електропобутова техніка”. Частина 1. «Аналіз лінійних систем автоматичного керування» / Г.Ф. Воронін, С.Л. Горященко. – Хмельницький : ТУП, 2003. – 60 с.

5. Васильев В.Г. LabVIEW для изучающих теорию автоматического управления : учебное пособие. / В.Г. Васильев. – Тверь, 2012. – 159 с.

6. Борисевич А.В. Теория автоматического управления: элементарное введение с применением MATLAB / Борисевич А.В. – СПб : Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 200 с.

References

1. Popovych M.H., Koval'chuk O.V. Teoriya avtomatychnoho keruvannya. – K.: Lybid', 1997.– 544s.

2. Vlasov K.P. Teoryya avtomatycheskoho upravlenyya. Uchebnoe posobye. - X.: Yzd-vo Humanytarnyiy tsentr, 2007. - 526 s.

3. Teoriya avtomatychnoho keruvannya. Konspekt lektsiy dlya studentiv spetsial'nosti „Obladnannya lehkoyi promyslovosti ta pobutovoho obsluhovuvannya” / H.F.Voronin. – Khmel'nyts'kyy: TUP, 2002.– 50 s.

4. Teoriya avtomatychnoho keruvannya. Laboratornyy praktykum dlya studentiv spetsial'nostey „Obladnannya lehkoyi promyslovosti ta pobutovoho obsluhovuvannya” i „Elektropobutova tekhnika”. Chastyna 1. «Analiz liniynykh system avtomatychnoho keruvannya» / H.F. Voronin, S.L. Horyashchenko. – Khmel'nyts'kyy: TUP, 2003.– 60 s.

5. Vasyl'ev V.H. LabVIEW dlya yzuchayushchykh teoryyu avtomatycheskoho upravlenyya. Uchebnoe posobye. / V.H. Vasyl'ev. - Tver', 2012. – 159 s.

6. Borysevych A.V. Teoryya avtomatycheskoho upravlenyya: elementarnoe vvedenye s prymenenyem MATLAB. - SPb.: Yzd-vo Polytekhn. un-ta, 2011. - 200 s.

Рецензія/Peer review : 04.11.2017 р. Надрукована/Printed :05.12.2017 р.
Рецензент: к.т.н., проф. Кармаліта А.К.

УДК 004:[681.625.9:678.01]

О.С. ПОЛІЩУК, П.Ф. ЗОЗУЛЯ, А.О. ПОЛІЩУК
Хмельницький національний університет

УЗАГАЛЬНЕНА КЛАСИФІКАЦІЯ ФІЛАМЕНТІВ ДЛЯ 3D-ДРУКУ

В даній статті розглядаються основні різновиди полімерних матеріалів, які використовуються для 3D-друку, їх властивості та області застосування для виробництва виробів та деталей у різних галузях промисловості. Створено узагальнену класифікацію філаментів по групах залежно від механічних та технічних властивостей. Також було складено таблицю з рекомендаціями щодо використання різних філаментів для виготовлення деталей та виробів в різних галузях промисловості.

Ключові слова: філаменти, 3D-технологія, 3D-друк, полімерні матеріали.

O.S. POLISHCHUK, P.F. ZOZULIA, A.O. POLISHCHUK
Khmelnytskyi National University

GENERALIZED CLASSIFICATION OF FILAMENTS FOR 3D-PRINTING

This article is devoted to the analysis and classification of varieties of filaments used for modern 3D printing and their use in light, shoe industry, engineering and other industries. Modern inventions and developments are not in place and 3D technology is a vivid example. 3D printing is one of the most revolutionary technologies of our time and one of the forms of additive technology, where a three-dimensional object is created by applying successive layers of material. In this article we consider the most popular types of materials that are present in the modern industrial market. Many types and subspecies of additive materials for printing are described. For the first time, a 3D material classification scheme has been drawn up, which gives a complete picture and description of each type, purpose, etc. The potential of 3D technology development is really high and is capable of speeding up scientific and technological progress. Thanks to 3D printing, experts from different industries will be able to study the market as much as possible, they can prepare prototypes of products, and also create several variants of prototypes of the same product at the same time. The application of 3D printing technology in various industries is a huge leap forward, capable of solving various problems and raising it to a qualitatively new level. A generalized table of filaments has been created in groups depending on the mechanical, technical properties and applications of different manufacturers. Also, in order to facilitate the selection of filaments for printing at the product design stage, and based on the technical characteristics and application areas of the 3D filaments under consideration, a table with recommendations for their use for the manufacture of parts and products in various industries in the modern labor market was compiled.

Key words: filaments, 3D technologies, 3D-printing, polymer materials.

Вступ

У сучасному світі адитивні технології застосовуються в різних галузях промисловості. Світові тенденції періодично вражають новинами про те, як на 3D-принтері надрукували зброю, людський орган, одяг, дім, автомобіль. Потенціал розвитку даних технологій дійсно високий і здатний на порядок прискорити розвиток наукового-технічного прогресу. Наукові лабораторії з використанням розроблених філаментів та 3D-принтерів створюють різні деталі та вироби в галузевому машинобудуванні, архітектурі, ювелірній справі, медицині, дизайні та інноваційні матеріали і тканини для виготовлення виробів легкої промисловості [1].

Постановка проблеми

Асортимент матеріалів для 3D-друку є досить різноманітним. Як правило, для друку використовуються термопластики, але є і виключення - композитні матеріали, що містять різні добавки, але створені, знову-таки, на основі термопластиків. Вихідною сировиною для створення філаментів для 3D-друку є різні полімерні матеріали такі, як гомо-, так і сополімери.

Використання 3D-пристроїв відкриває нові можливості в різних галузях промисловості, зокрема в: машинобудуванні; архітектурі; медицині; важкій, текстильній, харчовій та ювелірній промисловостях тощо. Матеріал в 3D-друку, як і в будь-якій творчій діяльності, є одним з найважливіших елементів. Від матеріалу залежать не тільки механічні та хімічні властивості майбутнього виробу, але і його естетична цінність. І для того щоб вибрати потрібний матеріал для 3D-друку для досягнення тієї чи іншої задачі необхідно розібратися які є види філаментів, які вони мають властивості та умови експлуатації і як вони співвідносяться з потребами, якістю і способом друку, матеріальною сферою і застосуванням. Щоб знайти відповідь на ці та інші запитання потрібно розглянути основні види 3D філаментів та їх технічні характеристики. Тому у даній статті в подальшому буде проведено детальний огляд філаментів для 3D-друку, що випускаються різними виробниками, їх властивостей та сфер застосування.

Метою статті є складання узагальненої класифікації філаментів для 3D-друку по основних групах їх призначення, зведення характеристик, що їх характеризують в єдину таблицю та надання рекомендацій по вибору 3D пластиків для виготовлення певних виробів або деталей.

Виклад основного матеріалу

Сучасні системи 3D-друку дозволяють швидко і якісно вирішувати широке коло завдань, що стоять перед інженерами, конструкторами, технологами в машинобудівній галузі та легкій промисловості. 3D-принтери стають незамінними як на етапі створення концептуальних зразків, так і для виробництва готових виробів.

Усі витратні матеріали діляться на дві групи: матеріали для 3D-друку по технології FDM та матеріали для 3D-друку по технології **SLA.** Технологія FDM є найбільш популярною, тому вибір матеріалів

для 3D-принтерів найбільш широкий. **Тому більш детально в даній статті будуть розглянуті саме матеріали** для FDM 3D-друку.

В залежності від спеціалізації матеріали для FDM 3D-друку можна також розділити на декілька груп, кожна з яких призначена для виконання певних технологічних задач.

1. Філаменти загального призначення. Використовуються для створення виробів, які не знаходяться під дією значних механічних, термічних та інших видів навантаження і які використовуються найчастіше.

До філаментів загального призначення можна віднести найбільш поширені на ринку України 3D пластик ABS та PLA.

3D пластик ABS (акрилонітрилбутадієнстирол). Один із самих популярних матеріалів для FDM 3D-друку. Даний тип пластику виготовляє багато виробників, зокрема це фірми: MonoFilament (Україна), 3Dplast (Україна), 3DDevice (Китай), Verbatim (Китай) тощо. Але пластик різних виробників різниться між собою розбіжністю основних технічних характеристик. Даний матеріал краще за інші матеріали піддається механічній і хімічній обробці. Дозволяє здійснювати друк на високій швидкості.

Основні властивості: ударостійкість, жорсткість, термостійкість, довговічність, вологостійкість; стійкість до деяких кислот та олив, розчинність в ацетоні, має широкий діапазон експлуатаційних температур готової продукції (від -40^{o}C до +90^{o}C). Основними недоліками є: нестійкість до органічних розчинників, низька світлостійкість, необхідність підігрівати платформу, щоб не допускати деформації моделей при 3D-друку.

Застосовується для виготовлення: корпусів, кріплень та деталей для різної техніки; механічних деталей, які працюють без значних навантажень; інтер'єрних та екстер'єрних деталей автомобілів; декоративних і декоративно-прикладних виробів; збірних габаритних виробів, підставок, контейнерів і т.п. Завдяки своїм властивостям є вдалим матеріалом для прототипування.

3D пластик ABS +. Це нова полімерна мононитка, розроблена для більш якісного 3D-друку. Модифікована формула пластика ABS + має ряд переваг у порівнянні зі звичайним пластиком ABS.

До його переваг порівняно з пластиком ABS можна віднести: кращу адгезію шарів; прилипання навіть до холодного столу; більш високу міцність; стійкий до дії кислот; довговічність; вологостійкість готових виробів; не токсичність; меншу усадку в процесі друку і т.п. Більш низька температура друку, дозволяє уникнути проблем прилипання до основи, деламінації і деформації готової моделі, що в свою чергу впливає на якість готових виробів, відповідає заданим розмірам, габаритам і формі [2].

3D пластик PLA (полілактид). Другий за популярністю матеріал для FDM 3D-друку. Екологічно чистий, біорозкладний пластик на основі полімерів молочної кислоти. Використовується для виробів з підвищеними санітарними вимогами, а також з високими вимогами до точності і деталізації. Добре піддається механічній обробці, але поступається в цьому пластику ABS. Даний тип пластику виготовляє багато виробників, зокрема це фірми: MonoFilament (Україна), 3Dplast (Україна), 3DDevice (Китай), Verbatim (Китай) тощо. Але пластик різних виробників різниться між собою розбіжністю основних технічних характеристик. Наприклад пластик PLA фірми 3DDevice має зовнішній вигляд з ефектом шовку.

Основні властивості: не токсичність та безпечність (відсутність виділення токсинів при друку не наносить шкоди здоров'ю людини); біорозпадність; економічність під час друку, завдяки низькій температурі плавлення матеріалу , відсутність деформації під час охолодження; збереження насиченості кольорів тощо [2]. При використанні при друку пластиків PLA Lowcost, PLA Silk можливою є відсутність нагрівання платформи завдяки їх кращих адгезійних властивостей прилипання до робочої поверхні.

Застосовується для виготовлення: дитячого та одноразового посуду; дитячих іграшок; предметів медичного призначення; художніх й декоративних виробів, які не потребують після друкарської обробки; харчової упаковки, ємностей для харчових продуктів (наприклад холодильних камер) і медичних препаратів; сувенірів; плафонів; деталей холодильних камер; виробів в різних дизайнерських проектах тощо. Його використовують також для друку різних прототипів виробів, які експлуатуються протягом тривалого проміжку часу.

3D пластик PLA+. По суті являє собою оптимізований PLA пластик з покращеними властивостями. Він відрізняється підвищеною міцністю та тим, що краще переносить механічні дії. Крім того, пластик PLA + більш стійкий до розтріскування. Такий ефект досягається за рахунок включення до складу матеріалу допоміжних біо-поліефірних сумішей. Незважаючи на це, пластик не втратив основних властивостей PLA і залишився безпечним і нетоксичним. Пластик не схильний до основних проблем «батьківського» матеріалу і підходить для всіх моделей 3D-принтерів, що працюють по технології FDM друку [3].

2. Технічні пластики. В основному пластики даної групи застосовуються для виготовлення деталей механізмів, конструкційних елементів і інших високоміцних та зносостійких виробів. Технічні пластики, що виготовляються та набули широкого використання при 3D-друку відповідно за їх технічними характеристиками та властивостями можна розділити на дві групи I - міцні та II - гнучкі.

До I групи можна віднести наступні типи філаментів: PET, PETG, PC, PBT, Nylon, PEEK, Carbon Fiber, CoPET, POM, PP. В свою чергу до II групи можна віднести: Elastan, Plastan, Filaflex, Primalloy, TPU, ColorFabb.

Розглянемо технічні характеристики та сфери застосування філаментів, що віднесені до I групи.

3D пластик PET (поліетилентерефталат або поліестер). Один з найпоширеніших термопластиків в промисловості, який знайшов застосування і в 3D-друку. Застосується для виробів, що контактують з

харчовими продуктами [3].

Основні властивості: міцність; еластичність; в'язкість; зносостійкість; термостійкість; стійкість до більшості кислот; хороший діелектрик. Використовується для виготовлення: зубчастих коліс і деталей механічних передач; конструкційних елементів, які піддаються динамічним навантаженням; ємностей для харчових продуктів і посуду; світло пропускних елементів; корпусів техніки; декоративних напівпрозорих виробів; електромонтажної фурнітури; різних медичних ємностей тощо.

3D пластик PETG. Це модифікована версія пластика PET. За рахунок додавання в основну речовину (поліетилентерефталат) гліколю на виході виходить абсолютно новий матеріал з іншими властивостями. PETG не піддається кристалізації при нагріванні, оскільки володіє більш аморфною структурою. Це технічний пластик, який перевершує за характеристиками розглянуті вище пластики PLA і ABS. Хоча за властивостями він ближче до пластика ABS. Він практично не схильний до усадки і деформації при охолодженні, відрізняється високою механічною міцністю, жорсткістю і стійкістю до дії широкого діапазону температур. Матеріал довговічний і має високу ударну в'язкість. Цей пластик визнаний безпечним при контакті з харчовими продуктами.

Всі особливості, перераховані вище, роблять його оптимальним варіантом для самих різних застосувань. За рахунок високої ударної в'язкості PETG є незамінним матеріалом для виробництва виробів, що піддаються механічному впливу. А завдяки високій прозорості він підходить для створення декоративних виробів. Прекрасні механічні властивості роблять PETG ідеальним для технічної сфери, де він має застосування.

3D пластик PETG Clear. Це прозорий пластик, що є різновидом пластика PETG. Традиційно даний пластик використовується для виготовлення пластикових пляшок та інших харчових ємностей. Він має високу ступінь прозорості, міцності і легкості. Готові вироби прозорі , як скло і легко піддаються механічній обробці.

Пластик CoPET (поліетилентерефталат). Це модифікована версія пластика PET. Це новий зміцнений матеріал, що представляє собою міцний, вогнестійкий аморфний матеріал з гладкою поверхнею та має високу ступінь прозорості з рівномірним світлорозсіюванням. CoPET являється єдиним пластиком, який може піддаватися деформації в холодному стані без утворення тріщин. Це оптимізований матеріал, який підходить для 3D-друку на більшості настільних 3D-принтерах. Готові вироби з пластика CoPET відмінно реагують на механічну обробку (свердління, шліфування, фарбування, лакування та ін.). Діапазон експлуатаційних температур – від -40 °C до + 70 °C. Може бути підданий загартуванню, після якого максимальна температура експлуатації підвищується до 220 °C.

Основними перевагами даного пластика є: ударостійкість; довговічність; зносостійкість; не розчинність у воді; стійкість до соляних і лужних розчинів, жирів і олив; відсутність внутрішніх пор у матеріалі; глянцева поверхня готових виробів; висока адгезія між шарами; відмінне прилипання до столу; вироби не тріскають після друку; не токсичність. Використовується для виготовлення: пляшок для води і газованих напоїв; виробів технічного призначення, однією з вимог до яких буде рівномірне пропускання світла.

3D пластик PC (полікарбонат). Один з найбільш міцних матеріалів для FDM 3D-друку. Використовується для виготовлення високоміцних виробів, що працюють під високим навантаженням. Більш твердий і міцний, ніж PET, але менш в'язкий.

Основні властивості: висока міцність; твердість; пружність; зносостійкість; термостійкість; довговічність; стійкість до кислот; екологічність. Використовується для виготовлення: зубчастих коліс і деталей механічних передач; конструкційних елементів, що працюють при статичних навантаженнях; захисних споряджень; світло пропускних елементів; харчових контейнерів; захисних окулярів; ударостійкого скла тощо.

3D пластик PBT (полібутилентерефталат). Це полімер, що кристалізується та відноситься до складних насичених поліефірів. Набув широкого поширення як конструкційний пластик. Використання полібутілентерефталата як конструкційного термопластичного матеріалу пов'язано з його базовими властивостями і можливістю різноманітної модифікації матеріалу.

3D пластик Nylon (нейлон). Один з найбільш привабливих матеріалів для 3D-друку технічних виробів. Nylon (PA6) відноситься до конструкційних (інженерних) полімерних матеріалів. Це жорсткий пластик, що кристалізується та має високу міцність на розрив і стійкість до зносу. Відрізняється високою температурою розм'якшення і еластичністю при низьких температурах, витримує стерилізацію парою, розігрітою до 140 °C. Це дозволяє використовувати його в умовах з температурними перепадами в широкому діапазоні.

Використовується в промисловості для виробництва деталей, що працюють під високим навантаженням, а також для виготовлення високоміцних тросів, тканин, струн музичних інструментів. В легкій промисловості використовується для виробництва деталей одягу. Має високі трибологічні властивості - низький коефіцієнт тертя і стійкість до абразивного зносу, що дозволяє застосовувати нейлон в парах тертя. Це оптимальний варіант для його найрізноманітніших застосувань.

Основні властивості: висока міцність, в тому числі на розрив; гнучкість; еластичність; зносостійкість. Має виняткові антифрикційні властивості. Застосовується для виготовлення: зубчастих коліс і деталей механічних передач, що працюють на високих оборотах, в тому числі деталей пар тертя; конструкційних деталей, що працюють в режимі динамічного та статичного навантаження; пластикових

деталей механізмів автомобіля (заслінки, важелі, втулки, шестерні); захисних контейнерів, електромонтажної фурнітури; елементів одягу тощо.

3D пластик PEEK (поліефіреф іректон). Завдяки своїм унікальним властивостям PEEK володіє багатьма перевагами перед іншими полімерами і може бути використаний як заміна металу. До матеріалу PEEK може застосовуватися різний дизайн, і він, на відміну від металу, не піддається дії корозії. Низька щільність (в два рази менша, ніж у алюмінію) дозволяє знизити вагу будь-якої моделі.

Основними його властивостями є: можливість витримування високих тисків, відмінна фрикційна поведінка, низька займистість, відмінна міцність, жорсткість та хімічна стійкість. Є відмінним діелектриком [3].

Таким чином, PEEK застосується в таких галузях як автомобілебудування, електроніка, напівпровідники, машинобудування тощо. У FDM 3D-друку, PEEK особливо підходить для виробництва дрібними серіями, або для виробництва спеціального дизайну, прототипів. В машинобудуванні та автомобільній індустрії можна використовувати для виготовлення підшипників кочення і ковзання, клапанів, упорних шайб, поршневих кілець, ізолюючих шарів, шестерень, втулок, корпусів насосів, дозуючих поршнів, лампових патронів, електричних вилок. Завдяки тому, що даний матеріал є тугоплавким, не виділяє газів, може бути ізольованим або проводити електрику, його можна використати для виготовлення виробів та деталей в галузі напівпровідників і електротехніки. Завдяки своїй теплостійкості та удароміцності є незамінимим матеріалом для багатьох галузей промисловості.

3D пластик Carbon Fiber. Це унікальний матеріал на основі полімеру з додаванням вуглецевого волокна. За рахунок цього на виході отримується міцний і легкий полімер. Завдяки меншій вазі вироби із даного матеріалу можуть використовуватися в якості аналогів готових виробів там, де необхідно їх полегшена версія. В плані ваги карбоновий пластик значно виграє в порівняні з традиційними матеріалами [3].

Основні властивості: висока міцність, стабільність; стійкість до механічних впливів; невелика вага виробу при високій жорсткості; мала усадка; стійкість до дії УФ-випромінювання, температурного і механічного впливу. Застосовується для виготовлення: різних інженерних деталей; виробів радіо- і електротехніки; екранів, що поглинають електромагнітне випромінювання; деталей кузовів і салону автомобіля; ексклюзивних деталей збірних велосипедів тощо.

3D пластик Carbon Fiber XT-CF20. Це різновидність 3D пластика Carbon Fiber. Це перша розробка від Європейської компанії ColorFabb, призначена для виготовлення деталей високої жорсткості. Даний пластик представляє собою об'єднання вуглецевого волокна (20%) і композитного матеріалу на основі складного сополіефіру. Таке поєднання забезпечує високу міцність, невелику вагу і приємну матову поверхню друкованих виробів.

Основні властивості: висока ударна в'язкість; висока міцність розплаву; високий модуль пружності на згин (в 2 рази перевищує аналогічне значення для PLA пластику); помірне видовження на розрив; висока температура склування; добра розмірна точність і стабільність. Використовується для виготовлення: функціональних модулів і прототипів; різних готових виробів.

3D пластик POM (поліацеталь). На відміну від інших пластичних мас, поліацеталь поєднує високу жорсткість і достатню твердість полімерного моноліту з хорошою стійкістю до динамічних, особливо до ударних навантажень. Він не втрачає своїх властивостей і при низьких температурах.

Основними перевагами даного філаменту є: висока міцність, в'язкість, жорсткість; зносостійкість; стійкість до різних олив, тертя і ударних навантажень; не шкідливість. Перевершує за своїми фізико-механічними властивостями NYLON. Застосовується для виготовлення: різних виробів технічного призначення; високоміцних деталей з низьким коефіцієнтом тертя; шестерень, вкладишів підшипників ковзання; деталей авто; корпусів електроприладів, електротехнічних деталей і арматури; волокон; виробів для харчового обладнання і медицини тощо.

3D пластик PP (поліпропілен). Це один із найбільш популярних видів пластику в промисловості. Він активно застосовується для виготовлення посуду і будь-яких механізмів, які так чи інакше причетні до процесу приготування їжі (механізми, форми, упаковки і т.п.). Крім того, даний пластик незамінний для виготовлення дитячих іграшок. Відрізняється високими механічними характеристиками.

Основні властивості: висока ударна міцність під час розтягування; твердість; надійність; довговічність; гнучкість й еластичність; низька паро-, газопроникність; стійкість до впливу кислот, лугів і органічних розчинників, перепаду температурних режимів, багаторазових згинів та УФ-випромінювання; невелика маса; висока ступінь прозорості. Використовується для виготовлення: посуду; упаковки для їжі; пляшок; кухонних та побутових виробів.

Розглянемо технічні характеристики та сфери застосування філаментів, що віднесені до II групи.

3D пластик Elastan (еластан). Основною особливістю даного матеріалу є його висока еластичність, чого бракує більшості інших матеріалів. Матеріал має ефект пам'яті форми, тобто здатність повертатись до своєї вихідної форми після деформації та високу зносостійкість, що прекрасно підходить для виготовлення предметів одягу, в тому числі взуття. Також даний філамент застосовується майже у всіх сферах промисловості [2].

Основні властивості: пружність; еластичність; ударостійкість; міцність на розрив; гнучкість; стійкість до водної ерозії, УФ-випромінювання, радіації, розчинників і палива [2]. Застосовується для виготовлення: демпферних, герметизуючих, антивібраційних елементів деталей механізмів і обладнання; захисних еластичних протиударних контейнерів, чохлів, накладок; елементів протиковзання; декоративних

та декоративно-прикладних виробів.

3D пластик Plastan (пластан). Це прозорий пластик з аморфною структурою полімеру, з характерними пластичними властивостями. Відрізняється високою еластичністю при високій міцності. Добре піддається механічній обробці. В процесі друку відсутня деформаційна усадка, відсутнє короблення і деламінація.

Основні властивості: пружність; гнучкість; пластичність; термостійкість; стійкість до УФ-випромінювання, радіації та розчинників. Застосовується для виготовлення: повнотілих зубчастих коліс і деталей механічних передач; ущільнюючих і компресійних елементів механізмів (прокладок, кілець вставок і т.п.); демпферних і вібро- погасаючих елементів; захисних еластичних міцних контейнерів, чохлів, накладок і упаковки; елементів протиковзання [2, 4].

3D пластик Filaflex. Це пружний еластичний матеріал, що дозволяє створювати гнучкі деталі для багатьох галузей промисловості. Його особливістю є те, що він не втрачає форму при розтягу і має високу міцність на розрив.

Основні властивості: стійкість до механічних навантажень; висока міцність на розрив; не втрачає форму при розтягуванні; не руйнується розчинниками; не вступає в реакцію з різними оливами, має високу зносостійкість. Застосовується для виготовлення: предметів одягу, взуття, шкіргалантерейних виробів; аксесуарів годинників; складних 3D-моделей в комбінації із звичайним PLA пластиком.

3D пластик Primalloy. Це м'який гумовий матеріал на основі поліестера з підвищеними показниками термостійкості, механічної міцності, стійкості до стирання, дії олив і нафтопродуктів. Це високопродуктивний поліефірний матеріал на основі термопластичного еластомера (ТПЕ), який складається із суміші кристалічного поліефірного блоку (в основному ПБТ полібутилентерефталат) і тонкого шару поліефірного блоку (в основному політетраметиленефіргліколь). Ця суміш придає деталям, надрукованих даним пластиком, унікальну гнучкість без втрати міцності. Він міцний термопластичний еластомер (ТРЕЕ), що відрізняється більшою міцністю і еластичністю порівняно з традиційними термопластичними еластомерами. Виключно точний діаметр і однорідна структура пластикового волокна забезпечують плавну роботу з матеріалом.

Основні властивості: еластичність; висока механічна міцність; зносостійкість; однорідність матеріалу. До недоліків даного пластика можна віднести те, що пластик під час друку виділяє специфічний запах, а перед початком друку потрібно покривати платформу поліамідною плівкою, а саму деталь після закінчення друку охолоджувати за допомогою кондиціонера. Застосовується для виготовлення гумових виробів, гнучких деталей в різних галузях промисловості.

3D пластик TPU (термопластичний поліуретан). У традиційній промисловості це досить поширений матеріал, який застосовується для виготовлення широкого спектру різних виробів. У 3D-друк пластик TPU прийшов відносно недавно, і ще не встиг набути достатню популярність. Проте, за своїми фізичними і механічними властивостями цей полімер дуже цікавий. Він досить міцний при високій гнучкості, а при охолодженні практично не дає усадки. Є одним із видів гнучких 3D-пластиків і підходить для застосування в різних моделях 3D-принтерів. Цей матеріал практично не розшаровується, має прекрасну адгезію між шарами. Однак через високу гнучкість 3D-друк може вимагати певних зусиль і особливих налаштувань 3D-принтера.

Основні властивості: стійкість до стирання; зносостійкість; пружність і еластичність; стійкість до олив; витримує низькі температури. З недоліків полімеру можна відзначити складність в обробці після виготовлення (він практично не піддається шліфуванню, фарбуванню і т.п.). Застосовується для виготовлення гнучких і одночасно міцних деталей, які витримують температуру навколишнього середовища до 80 ^{0}C.

3D-пластик ColorFabb XT Clear. Це чудова альтернатива PLA пластику. Даний пластик можна використовувати навіть на 3D-принтерах без підігріву столу. Основним компонентом даного пластику є пластик PETG, який характеризується величезною довговічністю і високою температурою плавлення. Матеріал володіє певною еластичністю, що залежить від товщини. Якщо надруковану деталь гнути, але не ламати, то вона повернеться до колишньої форми. Поверхня моделей виходить трохи глянцевою, що може бути вельми привабливим в ряді випадків.

Основні властивості: висока жорсткість; прозорість; міцність; має термоусадку подібну до пластика PLA, можливість друку на холодній платформі, стійкість до високих температур (не боїться високих температур у побуті). Застосовується для виготовлення виробів для побутових цілей та харчових ємностей.

3. Специфічні матеріали. Це група унікальних 3D філаментів, які мають властивості не притаманні звичайним пластикам. До даної групи можна віднести наступні види 3D матеріалів: T-Glase; ABS Conductive; PET пластик флуоресцентний; полілактокапрон PLC; 3D пластик вогнетривкий; Color Changing Filamet.

3D пластик T-Glase. Це якісний матеріал для 3D-друку американського виробництва. Пластик для 3D-принтера T-Glase є низькотемпературним матеріалом з високим ступенем прозорості, а також з високою жорсткістю. Даний пластик може контактувати з продуктами і може застосовуватися для виготовлення харчових контейнерів. При цьому під час 3D-друку матеріал не виділяє запаху і парів.

Основні властивості: висока міцність та прозорість; низька усадка, нетоксичність та безпечність; можливість переробляти пластикові відходи в нову пластикову нитку. Застосовується для виготовлення:

деталей для різних інженерних задач і створення функціональних елементів; харчових контейнерів; ємностей для рідини і їжі.

3D пластик PET флуоресцентний. Це якісний матеріал для 3D-друку.

Основні властивості: підвищена міцність; довговічність і зносостійкість; не токсичність; вологостійкість; теплостійкість; стійкість до дії кислот та олив; розчинність в ацетоні. Недоліками є: нестійкість до органічних розчинників, низька світлостійкість, низька адгезія між шарами деталі, погано переносить вплив ультрафіолетового випромінювання. Застосовується для виготовлення різних промислових і міцних деталей.

3D пластик ABS Conductive. Це високоякісний матеріал, який проводить електричний струм і має антистатичні властивості. Він має в своєму складі стандартну основу, але до неї додаються електропровідні компоненти і вуглецеві волокна.

Основні властивості: струмопровідність 1000 Ом/см; відмінна механічна та ударна міцність; опір до високих і низьких температур; друк звичайними налаштуваннями ABS пластика. Застосовується для виготовлення різних промислових і електропровідних деталей та для екранування електромагнітних перешкод.

3D пластик PLC (полікапролактон). Це новинка в 3D-друку, що володіє нетиповими для цієї сфери властивостями. 3D пластик має незвичайні властивості. За рахунок високої еластичності і низької температури плавлення він може використовуватися в якості матеріалу для ліплення. 3D пластик PLC є біорозкладним фотополімером, що представляє собою величезний інтерес для медичної промисловості. Він повністю розкладається під впливом ультрафіолетового освітлення, високих температур, мікроорганізмів і радіації. Підходить для використання в 3D-ручці.

Основні властивості: еластичність; біорозкладність; екологічність і безпечність; не міцний. Застосовується для виготовлення: одягу і взуття; харчових контейнерів і інших елементів, які передбачають тісний контакт з людським організмом.

3D пластик вогнетривкий. Даний пластик являє собою модифікований ABS з домішками спеціальних речовин, що забезпечують матеріалу захист від вогню. Він гасне протягом 10 секунд після усунення джерела вогню. Він стане прекрасним вибором для виробництва різних виробів, що вимагають вогнетривкості. У домішках, що додаються в 3D пластик, не міститься галогену. За характеристиками вогнетривкий пластик практично не відрізняється від звичайного ABS. У 3D-друку вогнетривкий ABS пластик може викликати певні складнощі. При необхідності можна використовувати спеціальний клей для ABS.

Основні властивості: висока між шарова адгезія; відмінна якість та гладка поверхня 3D-друкованих виробів. Використовується для виготовлення вогнетривких виробів для різних галузей промисловості.

3D пластик Color Changing Filamet. Даний пластик має відмінні термічні властивості. Він здатний змінювати колір під дією температури. Використовується для виготовлення: виробів у різних дизайнерських проектах; декоративних виробів і елементів декору; термостійких деталей для різних галузей промисловості.

4. Декоративні пластики. Це група пластиків, розроблених спеціально для виготовлення декоративних виробів. Деякі з них дозволяють імітувати традиційні матеріали (бронза, дерево, алюміній і т.п.). Декоративні пластики можна розділити на дві групи: I – дерев'яні пластики; II – металізовані пластики.

До I групи можна віднести Wood і BambooFill пластики що імітують деревину.

3D пластик BambooFill. Це високоякісний пластик, що імітує деревину. Пластик складається з дрібнодисперсного деревного порошку і полімерного з'єднувача, подібного за властивостями до пластика PLA. При певному режимі 3D-друку, дозволяє імітувати фактуру натурального дерева: річні кільця, кору та інше. Добре піддається поліруванню і іншим видам механічної обробки.

Основні властивості подібні до пластика PLA. Застосовується для виготовлення: виробів, що імітують дерево; декоративних та декоративно-прикладних виробів.

3D пластик Wood. Даний пластик один із унікальних матеріалів для друку на 3D-принтері. В його склад входить деревний пил і полімерна з'єднувальна речовина. Кількість деревного пилу в цьому матеріалі досягає 70%, що забезпечує йому приємну фактуру і характерний колір. В основному використовується деревний пил тополі. За характеристиками цей витратний матеріал нагадує пластик PLA і плавиться в тому ж температурному діапазоні (170–230 °C).

Основні властивості: вологостійкість, нетоксичність. При необхідності готові вироби добре шліфуються і покриваються лаком, що надовго зберігає їх властивості. Чим вище робоча температура при друку, тим темнішою буде модель. Застосовується для виготовлення: декоративних об'єктів; макетів; фурнітури для ремонту дерев'яних виробів, меблів і т.п.

До II групи можна віднести металізовані пластики такі як: BronzeFill, PLA Aluminium, PLA Brass, PLA Copper. Кожен із видів має свої особливості за рахунок додавання до складу різних часток металевого пилу.

3D пластик BronzeFill. Даний пластик імітує бронзу. В його склад входить дрібнодисперсний бронзовий порошок і полімерний з'єднувач, подібний до пластику PLA. Завдяки добрій електропровідності, дозволяє включати вироби в електричні ланцюги. Після полірування набуває блиск металу. Добре піддається механічній і хімічній обробці.

Основні властивості подібні до пластика PLA. Застосовується для виготовлення декоративних та декоративно-прикладних виробів [4].

Алюмінієвий 3D пластик (PLA Aluminium). Металізований пластик для друку на звичайному 3D-принтері. Даний пластик імітує алюміній. В його склад входить звичайний PLA пластик в якості з'єднувача і близько 30% алюмінієвої пудри. В якості різних функціональних деталей його краще не застосовувати , через PLA пластик в його складі.

Основні властивості подібні до пластика PLA. Застосовується для виготовлення декоративних та декоративно-прикладних виробів.

Латунний 3D пластик PLA Brass. Даний пластик імітує латунь. В його склад входить звичайний PLA пластик і близько 30% латунної пудри. Завдяки додаванню металевого порошку філамент має більшу міцність чим звичайний PLA пластик, але все таки його краще не використовувати для створення різних технічних компонентів.

Основні властивості: низька усадка при охолоджені; висока міцність; низька еластичність; можливість друку на холодній платформі. За властивостями і параметрам майже не відрізняється від PLA, але зовнішній вигляд деталей нагадує справжні металеві вироби, особливо після шліфування і полірування. Застосовується для виготовлення декоративних виробів.

3D Пластик PLA Copper. Як і більшість металізованих полімерів складається з пластика PLA як з'єднувальної речовини, і металевого порошку міді. Даний пластик імітує мідь. В якості різних функціональних деталей його краще не застосовувати , через наявність пластику PLA в його складі. Легкої обробляється механічними методами. В результаті обробки виробів з такого матеріалу можна домогтися практично глянцевої поверхні з металевим відливом. Оброблені моделі мало відрізняються від справжніх мідних виробів [5].

Основні властивості подібні до пластика PLA. Застосовується для виробництва декоративних виробів, іграшок і сувенірів.

4 Допоміжні матеріали. Це група пластиків, що застосовуються для побудови допоміжних технологічних елементів, необхідних для 3D-друку виробів, що мають складну просторову конфігурацію. Такі елементи після закінчення друку видаляються. Так як 3D-друк здійснюється пошарово, виникають ситуації, коли при побудові чергового шару з'являються частини, що виступають за габарити попереднього. Щоб такі частини не «висіли в повітрі», під ними спочатку друкуються спеціальні підтримки і підкладки. З цією метою використовують два найбільш ефективних і універсальних типи допоміжних пластиків PVA і HIPS.

3D пластик PVA (полівінілацетат (ПВА)). Це водорозчинний напівпрозорий матеріал на основі вінілацетату. У побуті відомий, як клей ПВА.

Основні властивості: нетоксичний, водорозчинний. Застосовується для виготовлення підтримок і підкладок при друку складних об'єктів; прототипів оскільки добре зберігає при друку задані розміри.

Пластик HIPS (полістирол). Це термопластичний полімер, на основі стиролу. Розчиняється органічним розчинником лімоненом. Він не володіє якимись видатними механічними властивостями, але він абсолютно незамінний при друку двома і більше екструдера, як матеріал для створення розчинних підтримок і спайок. Саме завдяки йому існує можливість створювати скільки завгодно складні об'єкти, особливо такі, де один предмет знаходиться всередині іншого [5].

Основні властивості: низька усадка, крихкість; не розчиняється у воді; якісна передача заданих розмірів; нетоксичність і безпечність; не коробиться і не повзе. Застосовується для виготовлення: підтримок і спайок при друку складних об'єктів; прототипів оскільки добре зберігає при друку задані розміри; виробів, що контактують із їжею.

Це далеко не повний перелік актуальних сучасних 3D матеріалів, а лише їх мала частина. Існують і інші матеріали для 3D-друку, що не увійшли до огляду у даній статті, це зокрема: COLORFUL, GLOW, ABS Antistatic, CERAMIC, GLASSFIL тощо. Їх властивості, технічні характеристики та сфери застосування будуть розглянуті в наступних роботах.

Результат роботи

На основі проведеного огляду 3D філаментів складемо їх узагальнену класифікацію (рис. 1) за групами залежно від механічних та хімічних властивостей, призначення та областей застосування і зведену таблицю з їх основними технічними характеристиками (табл. 1).

Наявність зведених основних технічних характеристик дозволить більш швидше проводити при необхідності вибір 3D матеріалів для 3D-друку залежно від призначення та умов експлуатації та здійснювати їх одночасний порівняльний аналіз.

Виходячи із приведених даних в даній таблиці, можемо зробити висновок, що всі матеріали для 3D-друку відрізняються один від одного, матеріал нитки може мати найрізноманітніші властивості. Філамент може бути хрумким або міцним, гнучким або твердим, гладким або шорстким, важким або легким і т.п.

Пластикова нитка може бути двох стандартних діаметрів: 1,75 і 3 мм. Природно, вони не взаємозамінні, і вибір потрібного діаметра слід уточнювати за специфікацією принтера. Пластикова нитка може бути різних виробників. Це можуть бути відомі світові бренди, але і виробники незрозумілого походження та не визначеної якості. Для кожного типу матеріалу повинні бути відомі робоча температура, до якої повинен нагріватися матеріал в друкуючій головці, і температура підігріву робочого столу (платформи) для кращого прилипання першого шару. Ці величини не завжди однакові для будь-якого зразка нитки, зробленої з матеріалу одного типу. Тому в таблиці вказаний приблизний діапазон. Оптимальні температури повинні вказуватися на етикетці котушки або в супровідному документі, але це відбувається далеко не завжди, і часто їх доводиться підбирати експериментально.

Рис. 1. Узагальнена класифікація 3D матеріалів

Таблиця 1

Основні технічні характеристики 3D філаментів

№№№/п	Матеріал	Технічні характеристики філаментів										
		Густина, г/см^3	ГГраниця міцності, МПа	Модуль пружності, МПа	ВВідн. видовж. на розрив і розтяг, %	ЛЛитєва усадка %	Поверхневий опір, Ом	Температура екструдера при друку, ^{0}C	ТТемпература стола при друку, ^{0}C	ШШвидкість друку, мм/с	Діаметр нитки пластику, мм	Виробник
11	ABS	1.04	38	2700		0,4		210-270	1100	440-70	1,75; 3	Esun, Китай
22	ABS+	1,06	38	2800	4	0,1		215-230	895	440-80	1,75;3	MonoFilament, Україна
33	PLA	1,2	40	2265	5			210-255	1100-120	440-70	1,75; 3	3DDevice, Китай
44	PET флуоресцентний	1,04	36	2265	4			210-245	1100-120	440-70	1,75	3DDevice, Китай
55	ABS Conductive	1,15	45	2000	10		10^3-10^5	210-270	1100	440-70	1,75	3DDevice, Китай
66	Carbon Fiber	1,11	44	4018	18		більше 10^{10}	220-240	1100-110	540-70	1,75	ColorFab, Голандія
77	Carbon Fiber XT-CF20	1,3	76			0,2	10^9	240-260		440-70		ColorFabb, Голандія
88	Carbon Esun EPA-CF	1,14	63,9	4387	4		10^{10}	240-260	660	40-60	1,75	Esun, Китай
99	PLA+	1,24	60		29	-		205-250	680	440-60	1,75; 3	Esun, Китай
110	BronzeFill	3,9						195-220	50-60		1,75;2,85	ColorFabb, Голандія
111	PETG Clear	1,38	55-57	280-3100				210-220	50	40-60	1,75;3	3DDevice, Китай
112	PLA Aluminium	1,29						190-230	060	340-150	1,75;3	3DDevice, Китай
113	PEEK	1,4	200	3600	25	0,1	3x10^6	380			1,75	3DDevice, Китай
114	CoPET	1,27	70	2100	5	0,2		230-240	470	440-60	1,75	MonoFilament, Украї
15	POM	1,41	65,5	2758	0		10^3-10^5	250-270			1,75	3DDevice,Китай
116	Primalloy	1,09	85		990			210-235	450		1,75	Verbatim, Японія
117	TPU	1,25	79,97					200-220	8100	340-50	1,75	3DDevice, Китай
118	HIPS	1,05		2400		0,8		230-240	9100	340-60	1,75;3	MonoFilament, Україна
119	PLC	1,16	29		11			70-100			1,75	Esun, Китай
220	FCoPet	1,27	570	2100				2230-240	440-70	440-60	11,75	MonoFilament, Україна
221	Flex	1,2	35		5			220-250	1100-110		1,75	3DDevice, Китай
222	PET	1,38	55-75	3000				210-230	890	440-60	1,75	3DDevice, Китай
223	BronzeFill	1,2						190-210	990	440-60	1,75	Esun, Китай

В ідеалі об'єкт повинен розроблятися під конкретний матеріал. Наприклад, якщо відомо, що 3D-

модель буде надрукована із пластику PLA, то необхідно дотримуватися конкретних рекомендацій при проектуванні виробу із цього матеріалу (це, наприклад підтримка нависаючих частин, укріплення виступаючих елементів, згладжування кутів і т.п.). Вибір матеріалів для друку зумовлює деякі з основних принципів проектування, які необхідно враховувати. Притримуватися правил проектування для конкретного матеріалу має велике значення для успішного друку. З цією метою необхідно користуватися довідковою літературою, зокрема даними, приведеними в табл.1.

З метою полегшення вибору полімерів на етапі проектування виробу, на основі технічних характеристик та областей застосування розглянутих 3D філаментів, було складено таблицю з рекомендаціями по їх використанню для виготовлення деталей та виробів в різних галузях промисловості (табл. 2).

Таблиця 2

Рекомендації по використанню 3D філаментів для виготовлення деталей та виробів

№/п	Назва деталі виробу	Використаний матеріал
1	Швейні вироби: деталі одягу швейна фурнітура	Elastan, PLC, Nylon
		ABS, HIPS, PC, PLC
2	Взуттєві вироби	PLA, PLA+, Filaflex, PLC, TPU
3	Галузеве машинобудування: корпуси деталей зубчаті колеса і деталі механічних передач різьбові з'єднання електричні пристрої, плати підшипники, деталі ковзання, шестерні	ABS, CoPet, ABS $^{+}$
		PET,PC, PBT,Nylon, Plastan,ABS
		PC, PBT
		ABS Conductive
		POM, Nylon, PET флуоресцент.
4	Деталі автомобілів, літаків	Carbon Fiber XT-CF20, Carbon Fiber, PC
5	Деталі холодильних камер	PLA, PET, PEEK
6	Механічні вузли, корпуси виробів	Carbon Fiber XT-CF20, Carbon Fiber, PET, CoPet
7	Електроніка, електромонтажна фурнітура	PET, PEEK, POM, HIPS, ABS Conductive, Nylon
8	Термостійкі матеріали	PC, ABS Conductive PET флуоресцентний, PET, Nylon, PEEK
9	Струмопровідні матеріали	ABS Conductive, BronzeFill, BambooFill
10	Вогнетривкі матеріали	вогнетривкий ABS, PEEK
11	Деталі для імітації дерев'яних поверхонь	BambooFill
12	Деталі для імітації металевих поверхонь	BronzeFill, PLA Aluminium, PLA Brass, PLA Copper
13	Вироби побутового призначення	PETG Clear, PLC, PP, T-Glace
14	Аксесуари	Color Changing
15	Зносостійкі матеріали	TPU, PET, Primalloy, PEEK

Висновки

В даній статті розглянуто основні види 3D філаментів, які використовуються для 3D-друку за технологією FDM. Проведено аналіз їх основних властивостей, технічних характеристик та сфер застосування. На основі здійсненого аналізу складено узагальнену класифікацію філаментів для 3D-друку за основними групами їх призначення, зведено характеристики, що їх характеризують в єдину таблицю та надано рекомендації з вибору певних видів 3D пластиків для виготовлення виробів або деталей в різних галузях промисловості.

References

1. Additivnye tekhnologii i 3D-pechat. URL: www.forbes.ru/tehnologii/342687-additivnye-tehnologii-i-3-d-pechat-v-poiskah-sfer-primeneniya.

2. MonoFilament. URL: file:///%20MonoFilament.html.

3. 3D Device. URL: file:///https://3ddevice.com.ua/shop/3d-plastic/?gclid=Cj0KCQjw4eXPBRCtARIsADvOjY3_AYEfJoNJ3pH5JFBmTwIATP1oTLogNa7QAEyw6jlT4CYyWjwZQkgaAssoEAL html

4. Printer dlya pechati obuvi. URL: http://3dmag.org/ru/blog/3d-printing/869.html

5. 3D Device. URL: file:/// https://3ddevice.com.ua/shop/metallizirovannye-plastiki

Рецензія/Peer review : 27.11.2017 р. Надрукована/Printed :03.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Кармаліта А.К.

УДК 632.382: 620.179.4

С.Л. ГОРЯЩЕНКО, О.О. НИКИТИН, Ю.Ю. КУШНІР, С.В. УСПАЛЕНКО
Хмельницький національний університет

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧОЇ СИСЕТЕМИ

У даній роботі розглядається математична модель динаміки системи опалення з герметично замкнутим контуром теплоносія – води, що нагрівається пропущенням через неї трифазного електричного струму. Нагріта вода надходить на обігрів приміщень за традиційною схемою водяного опалення (стояк подачі, батареї, стояк стоку, циркуляційний насос).

Модель дозволяє досліджувати питання економічної ефективності використання теплоакумуляторів, які накопичують тепло в нічний час, коли тариф на електроенергію мінімальний, і віддають тепло в систему опалення вдень, коли тариф максимальний. Максимум споживання електроенергії на опалення в нічні годинники створює сприятливі умови роботи електростанцій, які перевантажені в годинники денного пікового навантаження й практично розвантажені в нічні годинники.

Ключові слова: модель, автоматизація, теплоакумулятор.

S. HORIASHCHENKO, O. NIKITIN, J. KUSHNIR, S. USPALENKO
Khmelnytskyi National University

PROBLEMS OF PROTECTING COATINGS ON RULL TEXTAIL MATERIALS

In this paper, a mathematical model of the dynamics of a heating system with a hermetically sealed circuit of a coolant - water heated by passing through a three-phase electric current is considered. Hot water enters the heating of premises according to the traditional scheme of water heating (feedstock, battery, runner, circulating pump).

The model allows studying the economic efficiency of using heat accumulators that accumulate heat at night, when the tariff for electricity is minimal, and give heat to the heating system during the day when the tariff is maximal. The maximum consumption of electricity for heating at night hours creates favorable conditions for the operation of power plants that are overloaded in daily peak load hours and practically unloaded at night hours.

Keywords: *polymer coatings, devices for applying films, application of protective coatings*

Вступ

На відміну від традиційних теплотехнічних розрахунків, де досліджується статика - сталі процеси переносу тепла, динамічна модель дозволяє одержувати відповіді на такі питання як:

- ефективність стабілізації температури в приміщеннях при істотному коливанні зовнішньої температури протягом доби;
- економічна ефективність застосування теплоакумуляторів для зниження споживання електроенергії на опалення в годинники пік.

На рис. 1 показана схема електроопалення житлового будинку. Акумулятор тепла - це бак обсягу V_{tank}, повністю залитий непротічною водою. Вода в баці, що служить тепловою ємністю, через теплообмінник-змійовик усередині акумулятора одержує/віддає тепло воді контуру водяного опалення. Система обладнана приладами контролю:

T_{hot} – датчик температури води після електронагрівників,

T_{tank} – датчик температури води в баку теплоакумулятора,

T_{heat} – датчик температури води в стояку подачі,

T_{cool} – датчик температури води в стояку стоку (після батарей),

T_{room} – датчик температури повітря в опалювальних приміщеннях,

T_A – датчик температури зовнішнього повітря.

Залежно від T_A стабілізація температури в приміщеннях – T_{room} – досягається автоматичним включенням необхідного числа електро-нагрівачів.

Контур водяного опалення утворюють: блок електронагрівників з колекторами прийому й видачі теплоносія, теплообмінний змійовик у теплоакумуляторі, стояк подачі гарячої води на поверхи, батареї водяного опалення в приміщеннях, стояк стоку охолодженої води (після батарей), водяний насос, що забезпечує циркуляцію води в контурі опалення, ресивер - бачок для компенсації збільшення обсягу води при її нагріванні.

Основна частина

Верхній ряд блоків на рис. 2 моделює динаміку інерційних ланок, нижній ряд блоків моделює статику малоінерційних ланок.

Динаміка досліджуваного об'єкта описується системою диференціальних рівнянь в часток похідних. Використання динамічних моделей з рівняннями в частинних похідних веде до надмірного ускладнення самої моделі й дослідницьких експериментів на ній. Тому будемо використовувати спрощений підхід грубого обліку динаміки нагромадження/витрати тепла в елементах, що володіють значної тепловою ємністю, і безінерційною передачею тепла між іншими елементами системи.

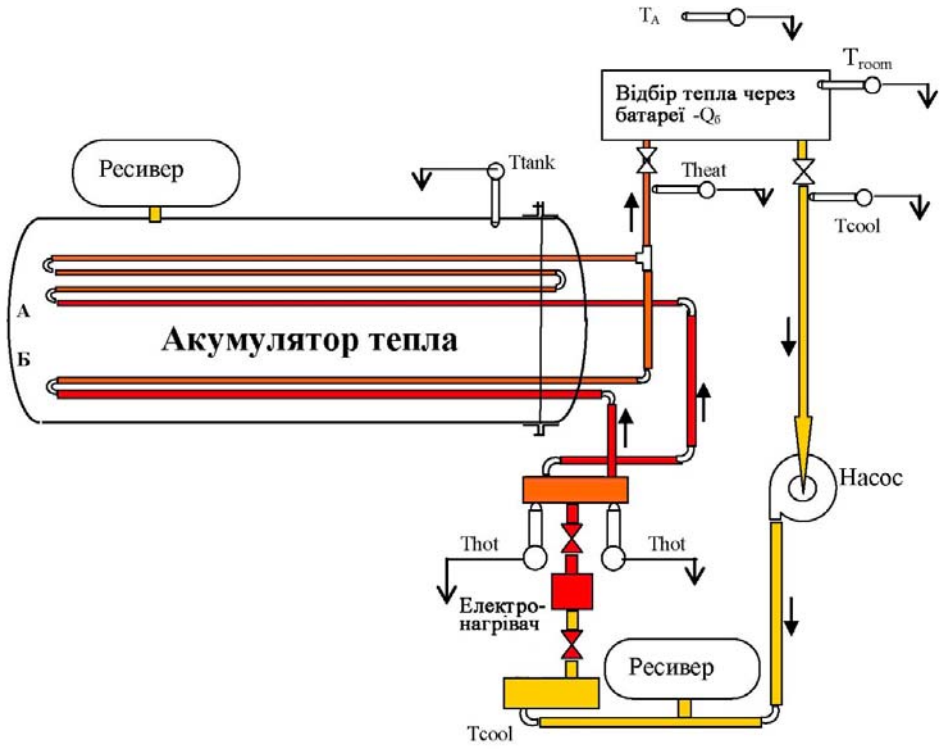


Рис. 1. Схема установки автоматизованої теплоакумулюючої системи

При спрощеному підході динаміка моделі може бути представлена у вигляді двох теплових ємностей: теплоємності бака теплоакумулятора й теплоємності повітря в опалювальних приміщеннях. Всі інші процеси теплообміну мають час перехідного процесу на 1-2 порядки менше, і розглядаються як статичні.

З метою максимального ілюстративного викладу вивід формул математичної моделі будемо супроводжувати прикладом конкретного теплового розрахунку. Паралельно з виводом формул будемо виконувати розрахунковий приклад для житлового будинку на 60 двокімнатних квартир із загальним обсягом опалювальних приміщень V_{rooms} = 10000 м^3, опалювальною площею S_{rooms} = 3700м^2, площею зовнішніх стін F_{walls} = 1986м^2, площею зовнішнього оскління $F_{windows}$ = 496м^2, площею покриття неопалюваного горища F_{attic} = 576 м^2, площею перекриття неопалюваного підвалу F_{cellar} = 576 м^3.

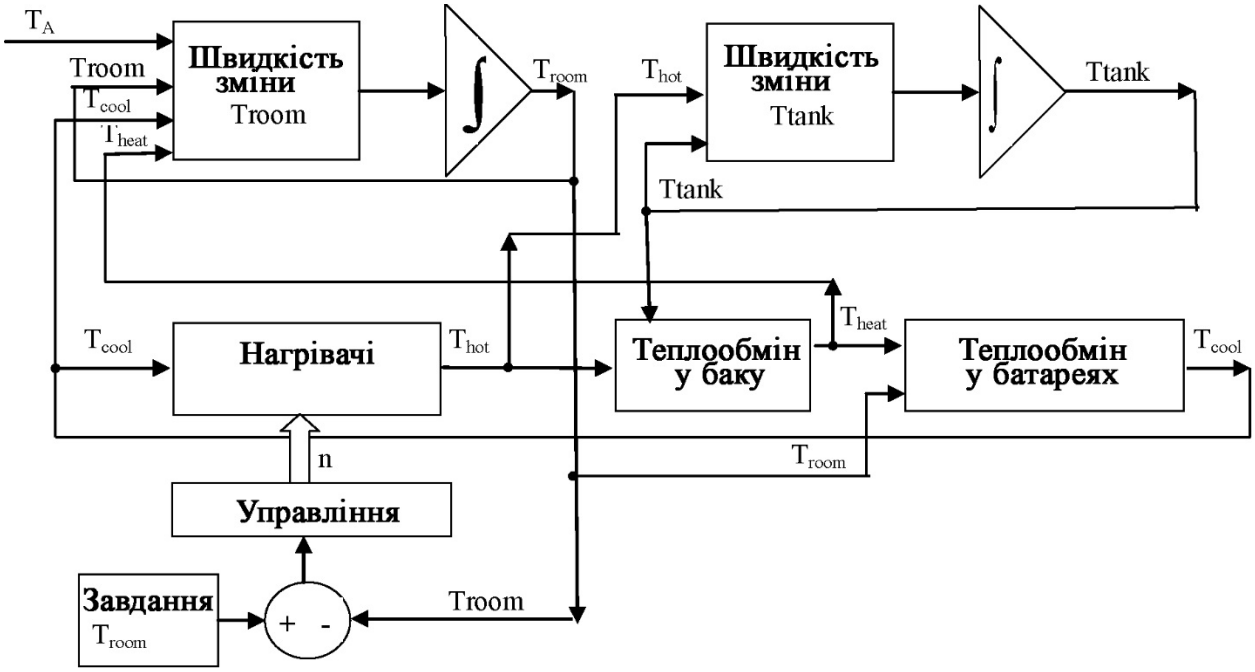


Рис. 2. Структура моделі динаміки системи електроопалення

Теплова інерція повітря приміщень додатково пов'язана з тепловою інерцією масивних непрозорих конструкцій, що обгороджують (стін). Цей другорядний фактор можна спрощено враховувати поправочним коефіцієнтом K_{walls}>1 до обсягу приміщень V_{rooms}.

По термічному опорі (Ri) всіх конструктивних елементів будинок задовольняє вимогам ДБН В.3.6-31:2006 [5], а саме: R_{walls} = 2.8м^2 К°/Вт; $R_{windows}$ = 0.6м^2 К°/Вт; R_{attic} = 3.3 м^2 К°/Вт; R_{cellar} = 2.8м^2 К°/Вт.

Циркуляційний насос пропомповує через систему теплоносій, при цьому витрата теплоносія становить G = 4000 кг/година.

Маса повітря M^{air} в обсязі опалювальних приміщень при температурі 20 °С і атмосферному тиску 760 мм.рт.ст. становить:

$$M^{air} = \rho_H^{air} V_{room}, \tag{1}$$

де $\rho_н^{air}$ = 1.2 кг/м^3 – щільність повітря при кімнатній температуру [5], M^{air} = 1.2·10000 = 12000 кг.

У кожний момент часу теплова ємність обсягу V містить певну кількість теплової енергії:

$$E = V \cdot c \cdot p \cdot T, \tag{2}$$

де E – кількість теплової енергії, ккал; V – обсяг простору, займаного нагрівається средой, м^3;
c – питома теплоємність нагрівається среды, ккал/(кг·°С); Р – щільність нагрівається среды, кг/м^3;
Т – температура нагрівається среды, К^0.

Відповідно, зміна теплової енергії в ємності за час dτ:

$$dE = V \cdot c \cdot p \cdot d\tau, \tag{3}$$

пов'язане із приходом- витратою тепла теплової ємності, тобто

$$\mathrm{dE} = \left(Q^{\mathrm{in}} - Q^{\mathrm{out}}\right) \cdot \mathrm{d}\tau, \tag{4}$$

де Q^{in} – потужність припливу тепла, ккал/година, Q^{out} – потужність відтоку тепла, ккал/година.

Для теплоакумулятора потужність приходу-витрати тепла залежить від того, яка температура більше. Якщо $T_{ак} > T_{г_t}$,то тепло акумулятора витрачається, якщо $T_{ак} < T_г$, то тепло в акумуляторі накопичується:

$$Q^{\mathrm{in/out}} = \mathrm{G} \cdot c^{\mathrm{H2O}} \cdot (\mathrm{T_{hot}} - \mathrm{T_{tank}}), \tag{5}$$

де G – витрата теплоносія, кг/година, c^{H20}=1ккал/(кг·К°) - теплоємність води.

Прирівнюючи (3), (5), одержимо:

$$\mathrm{V_{tank}} \cdot c^{\mathrm{H2O}} \cdot \rho^{\mathrm{H2O}} \cdot \mathrm{dT_{tank}} = \mathrm{G} \cdot c^{\mathrm{H2O}} \cdot \mathrm{T_{hot}} - \mathrm{T_{tank}}), \tag{6}$$

звідки

$$\mathrm{dT_{tank}} / \mathrm{d}\tau = \mathrm{G}(\mathrm{T_{hot}} - \mathrm{T_{tank}}) / (\mathrm{V_{tank}} \rho^{\mathrm{H2O}}). \tag{7}$$

Формула дозволяє обчислювати швидкість зміни температури води в баку теплоакумулятора як функцію від температур T_{hot} і T_{tank}.

Інтегруючи dT_{tank} / dτ, одержимо поточне значення температури води в баці (див. рис. 2).

Для повітря в опалювальних приміщеннях за аналогією з (2), (4) можна записати рівняння теплового балансу:

$$V_{\mathrm{room}} \cdot \rho_{\mathrm{room}}^{\mathrm{air}} T_{\mathrm{room}} = \left(\mathrm{Q_{in}} - \mathrm{Q_{out}}\right) \mathrm{d}\tau, \tag{8}$$

Потужність подачі тепла в будинок (потужність втрати тепла теплообмінниками опалювальних приміщень):

$$Q^{\mathrm{in}} = \mathrm{G} \cdot \mathrm{c}^{\mathrm{H20}} \cdot (\mathrm{T_{heat}} - \mathrm{T_{cool}}). \tag{9}$$

Потужність відводу тепла з опалювальних приміщень у зовнішнє середовище складається із двох складових:

$$\mathrm{Q_{out}} = \mathrm{Q_t^{out}} + \mathrm{Q_{inf}^{out}}, \tag{10}$$

де $Q^{out}_t = (T_{room}-T_A) \cdot \sum F_i / R_i$ – потужність тепловтрат квартири через зовнішні огородження, ккал/год,

$$\mathrm{Q_{inf}^{out}} = \mathrm{V_{rooms}} \cdot \mathrm{k_{inf}} \cdot \mathrm{c_{pair}} \cdot (T_{\mathrm{room}} - \mathrm{T}_A) \tag{11}$$

Потужність тепловтрат квартир через інфільтрацію зовнішнього повітря в кімнаті через вентиляцію й нещільності, ккал/година [6].

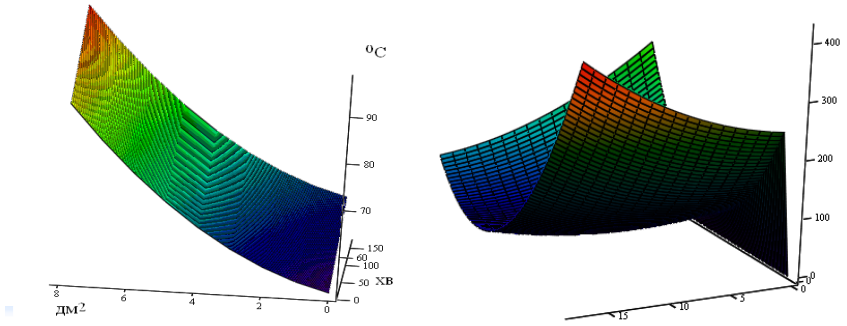
З (8), одержимо

$$\mathrm{dT_{room}} / \mathrm{d}\tau = (\mathrm{Q_{in}} - \mathrm{Q_{out}}) / (\mathrm{V_{room}} \cdot \rho_{\mathrm{room}}^{\mathrm{air}} \cdot \mathrm{c_{pair}}) \tag{12}$$

Формула дозволяє обчислювати швидкість зміни температури в опалювальних приміщеннях розрахункового прикладу як функцію від температур T_{heat}, T_{cool}, T_{room}, T_A. Інтегруючи dT_{room}/dτ, одержимо поточне значення температури в приміщеннях.

Висновки

Дослідження загального рівняння показує, що акумулювання енергії може здійснюватися в результаті зміни: питомої внутрішньої енергії; питомої потенційної енергії; питомої кінетичної енергії; маси системи. Віддача тепла залежить від площі теплообмінника та висоти приміщення, інфільтрації зовнішнього повітря в кімнаті через вентиляцію й нещільності, що впливає на якість балансу між швидкістю віддачі тепла та нагріванням приміщення. Отримані формули можуть бути використані для інженерних розрахунків та проектування/підбору теплоакумулятора на основі води.



а) **б)**

Рис. 3. Графік розповсюдження тепла в приміщенні: а) залежно від ефективності теплообмінника б) в верхній зоні приміщення

Література

1. Параска Г.Б. Дослідження впливу конструктивних параметрів обладнання на ефективність нагрівання та акумулювання тепла в теплоакумуляторі / Г.Б. Параска, С.Л. Горященко, А.І. Гордєєв, Є.О. Голінка // Materials Of The Xii International Scientific And Practical Conference Modern European Science - 2016 June 30 - July 7, 2016 Volume 9 Chemistry And Chemical Technology Mathematics Technical Science Sheffield Science And Education LTD 2016. p. 42–46.

2. Сотникова О. А. Аккумуляторы теплоты теплогенерирующих установок систем теплоснабжения / О. А. Сотникова, В. С. Турбин, В. А. Григорьев // АВОК. – М., 2003. – № 5. – С. 76–83.

3. Горященко С.Л. Моделювання теплових процесів теплоакумулятора / С.Л. Горященко, Є.О. Голінка // Матеріали XIII міжнародної науково-техн. конф., ВОТТП-13-2014. – С. 152–153.

4. Аналіз теплового стану цеху азотування металевих виробів та модернізація його опалення / Г. Б. Параска, С. Л. Горященко, А. В. Вітюк, Є. О. Голінка // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2014. – № 6. – С. 44–46.

5. Управління проектами енерговикористання : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закладів, які навч. за спец. "Енергетичний менеджмент" / Ю. Г. Качан, К. О. Братковська ; Запорізька інж. акад. – Запоріжжя : ЗДІА, 2014. – 141 с.

References

1. Paraska G.B., Goryashhenko S.L., Gordyeyev A.I., Golinka Ye.O. Doslidzhennya vply`vu konstrukty`vny`x parametriv obladnannya na efekty`vnist` nagrivannya ta akumulyuvannya tepla v teploakumulyatori // Materials Of The Xii International Scientific And Practical Conference Modern European Science - 2016 June 30 - July 7, 2016 Volume 9 Chemistry And Chemical Technology Mathematics Technical Science Sheffield Science And Education LTD 2016. p.42-46

2. Sotny`kova O. A. Akkumulyatoгы teploty teplogenery`ruyushhy`x ustanovok sy`stem teplosnabzheny`ya / O. A. Sotny`kova, V. S. Turby`n, V. A. Gry`gor`ev // AVOK. – M., 2003. – 5. – S.76-83.

3. S.L. Goryashhenko, Ye.O. Golinka. Modelyuvannya teplovy`x procesiv teploakumulyatora. Materialy` XIII mizhnarodnoyi naukovo-texnichnoyi konferenciyi, VOTTP-13-2014, s.152-153

4. Analiz teplovogo stanu cexu azotuvannya metalevy`x vy`robiv ta modernizaciya jogo opalennya / G. B. Paraska, S. L. Goryashhenko, A. V. Vityuk, Ye. O. Golinka // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2014. – Issue 6. – S. 44–46.

5. Upravlinnya proektamy` energovy`kory`stannya : navch. posib. dlya stud. vy`shh. navch. zakladiv, yaki navch. za specz. "Energety`chny`j menedzhment" / Yu. G. Kachan, K. O. Bratkovs`ka ; Zaporiz`ka inzh. akad. - Zaporizhzhya : ZDIA, 2014. - 141 s.

Рецензія/Peer review : 03.11.2017 р. Надрукована/Printed :07.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Скиба М.Є.

РАДІОТЕХНІКА, ЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 004.891

Д.О. ЯРОЩУК, О.А. МЯСИЩЕВ
Хмельницький національний університет

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ОБРАХУНКУ ВПЛИВУ ЗАГРОЗ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЗАКРИТОЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ

Розглядається завдання забезпечення ефективного функціонування телекомунікаційних мереж (ТКМ). Від того як функціонують ТКМ установи залежать критичні аспекти його діяльності. Найперспективнішим напрямком розвитку закритих мереж є перехід від орендованих каналів зв'язку до відкритих каналів мережі Інтернет. Однак використання відкритих Інтернет мереж призводить до загроз інформаційної безпеки. Розроблені методи оцінки захищеності об'єктів мережі від загроз інформаційної безпеки засновані на якісній експертній оцінці. Проведено удосконалення в переході до кількісної оцінки ефективності функціонування ТКМ на підставі критеріїв доступності інформації і послуг зв'язку.

Ключові слова: телекомунікаційна мережа, інформаційна безпека, ефективність, оцінка.

D.A. YAROSCHUK A.A. MYASISCHEV
Khmelnytsky National University

IMPROVING OF THE METHOD OF INFLUENCE OF INFRINGEMENT OF INFORMATION SECURITY ON THE EFFICIENCY OF FUNCTIONING OF CLOSED TELECOMMUNICATION NETWORK

The article deals with the task of ensuring the efficient functioning of telecommunication networks. From the functioning of the telecommunications network of the closed network of the educational institution, the critical aspects of its activity depend, the task of ensuring the effective functioning of the network is extremely acute. The most promising direction of the development of corporate networks that can meet the growing needs of private networks is the transition from using their own or leased communication channels to open, built with the use of the Internet or other networks. However, the use of open Internet networks is accompanied by the fact that they are exposed to the impact of specific for open telecommunication networks threats to information security, which affects their performance. The methods of assessing the security of network objects from threats of information security developed to this moment are based on qualitative expert evaluation. Their improvement is offered in the part of the transition to a quantitative assessment of the efficiency of telecommunication networks functioning on the basis of the criteria for the availability of information and communication services. Mathematical modelling, as well as natural experiments and statistical research methods are used to solve the problems. Experimental verification was carried out by conducting field experiments, using hardware and software used on communication nodes of the investigated network. The proposed method allows to evaluate the efficiency of the functioning of the corporate telecommunication network with the formation of the result of evaluation in the form of a quantitative indicator, thereby increasing the quality of the assessment. The software developed during the study is designed to quantify the performance of the network elements. As a result of this analysis, it is possible to use the mathematical and methodical apparatus of the theory of reliability for the analysis of the structural reliability of complex telecommunication networks. As an indicator of the efficiency of functioning of networks and their elements, Kg is chosen as the normalized reliability index of telecommunication networks and their elements. Thus, the possibility of increasing the efficiency of network operation by topological methods is substantiated.

Keywords: telecommunication network, information security, efficiency, evaluation.

Вступ. В умовах, коли системи зв'язку життєво необхідні для нормального функціонування організації, вони стають пріоритетною метою для зловмисників. Шляхом впливу на телекомунікаційну мережу (ТКМ) можливо організувати атаки, що реалізують загрози, спрямовані на всі три основні властивості інформації. Загроза безпеки інформації – це сукупність умов і факторів, що створюють потенційну або реально існуючу небезпеку порушення безпеки інформації. При реалізації загроз інформаційної безпеки (ІБ) виникає небезпека знищення, перекручення, блокування, копіювання, поширення інформації, а також інших несанкціонованих дій з нею.

Незалежно від конкретних видів загроз ІБ, що впливають на досліджувану інформаційну систему, потрібно забезпечити такі основні властивості автоматизованої системи та інформації в якій циркулюють: цілісність, конфіденційність і доступність. Конфіденційність інформації - це стан інформації, при якому доступ до неї здійснюють тільки суб'єкти, що мають на нього право. Цілісність інформації – це стан інформації, при якому її зміна здійснюється тільки навмисно суб'єктами, що мають на нього право. Доступність інформації – це стан інформації, при якому суб'єкти, які мають право доступу, можуть реалізувати його безперешкодно. На момент проведення дослідження завдання захисту переданої по ТКМ інформації від загроз цілісності і конфіденційності успішно вирішується застосуванням засобів криптографічного захисту інформації. У той же час загальне застосування рішення задачі забезпечення доступності інформації в ТКМ на момент проведення дослідження нам невідомо. В даному дослідженні під загрозою доступності інформації розуміються загрози ІБ, спрямовані на порушення доступності інформації. У даній роботі буде розроблений метод дослідження ТКМ, застосування якого дозволяє оцінити ефективність функціонування ТКМ в умовах впливу загроз доступності інформації. Таким чином, на основі дослідження, що враховує вплив загроз доступності інформації, стає можливим провести заходи, спрямовані на їх нейтралізацію та оцінити ефективність цих захисних заходів.

В даний час питаннями забезпечення і підвищення ефективності функціонування ТКМ займається досить велика кількість наукових колективів, провідні розробники з різних напрямків по всьому світі. Дослідником, що сформулював загальні вимоги до розробки відмовостійких систем, чиї праці лягли в основу багатьох перспективних розробок, є A. Avizienis, в дослідженнях якого (зокрема), визначено взаємозв'язок між надійністю обчислювальних систем і їх ІБ, а також розроблені підходи до забезпечення ІБ з боку забезпечення відмовостійкості.

Для вирішення завдання визначення показників надійності великих об'єктів, що складаються з безлічі різнорідних елементів, таких як ТКМ, використовується підхід їх моделювання у вигляді марківських процесів. Такий підхід є певним спрощенням в порівнянні з реальними процесами, що відбуваються в елементах ТКМ. У даній роботі використаний аналогічний підхід з вибором об'єкта дослідження у вигляді елементів ТКМ.

На сьогоднішній день розвиток інформаційних технологій і ТКМ призвело до того, що при побудові корпоративних інформаційних систем (ІС) в організаціях використовуються ТКМ загального користування (відкриті ТКМ). Використання мереж загального користування дозволяє організації заощадити значні кошти на оренду або побудові власної мережевої інфраструктури. Однак передача інформації за відкритими ТКМ несе в собі значні ризики, спрямовані на всі основні властивості інформації: цілісність, конфіденційність і доступність. Оцінка захищеності від загрози цілісності і конфіденційності на сьогоднішній день базується на превентивні заходи криптографічного захисту інформації. Однак загрози доступності інформації є специфічними для відкритих ТКМ, і на сьогоднішній день не існує єдиної методики їх оцінки. Найбільш поширені різні методики експертної оцінки ІБ, проте їх використання не може забезпечити формування цілісної об'єктивної картини.

Таким чином, використання єдиної методики, що включає в себе облік впливу як технічних характеристик ТКМ, так і їх захищеність від специфічних загроз ІБ, дозволить значно підвищити ефективність проектування захищених корпоративних ІС, оскільки одним з найважливіших показників при їх проектуванні є захист від загроз ІБ, в зокрема - забезпечення доступності циркулюючої в ІС інформації. Удосконалення методу оцінки та підвищення ефективності функціонування ТКМ є актуальним і затребуваним завданням.

Постановка задачі. Провести аналіз факторів, що впливають на забезпечення ефективного функціонування ТКМ, критеріїв та існуючих методів оцінки ефективності функціонування ТКМ. Визначити фактори, що впливають на ефективність функціонування ТКМ з боку загроз ІБ. Проаналізувати можливість застосування методичного та математичного апарату теорії надійності як методу дослідження ТКМ для оцінки впливу загроз ІБ на забезпечення ефективного функціонування ТКМ. Проаналізувати можливість підвищення ефективності функціонування вузлів зв'язку ТКМ шляхом вдосконалення їх мережевих топологій (топологічними засобами).

Основна частина. На ефективність функціонування ТКМ в першу чергу впливає працездатність елементів ТКМ. Для елементів ТКМ розрізняють 2 основних стани технічних пристроїв: працездатна і непрацездатна. Під працездатним станом розуміється стан виробу, при якому воно здатне виконувати необхідну функцію за умови надання необхідних зовнішніх ресурсів. Під непрацездатним станом - стан, при якому виріб не здатний виконувати необхідне завдання з будь-якої причини. Причини непрацездатності можуть мати різну природу, при цьому існують різні підходи до їх класифікації. Адаптована для ТКМ версія класифікації зображена на рис. 1.

На рис. 1 представлена діаграма причин відмов елементів ТКМ. У червоному секторі згруповані первинні відмови елемента, причиною яких є елемент сам по собі. Причини первинних відмов можуть бути обумовлені як недосконалістю технологічних процесів при виробництві елемента (заводським дефектом), так і природним старінням елементів по закінченню рекомендованого періоду експлуатації. У синьому секторі згруповані вторинні відмови елементів. Причиною вторинного відмови є не елемент сам по собі, а якісь зовнішні чинники. Ними можуть бути неякісні зовнішні ресурси, необхідні для нормального функціонування елемента – вихід параметрів навколишнього середовища за межі, передбачені виробником обладнання, проблеми пов'язані з електроживленням обладнання, пошкодження, викликані виходом з ладу сусідніх елементів, інженерно пов'язаних з ними. У зеленому секторі згруповані відмови, викликані людським фактором і неправильною експлуатацією обладнання. Переважно до них відносяться неправильні команди персоналу. Незважаючи на те, що в кінцевому підсумку наслідком будь-якої з перерахованих вище причин є порушення працездатності елемента ТКМ, відмови з різними причинами їх виникнення враховуються в показниках надійності по-різному.

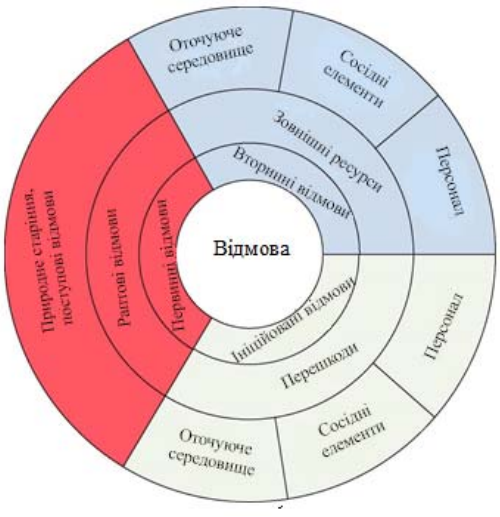


Рис. 1. Діаграма відмов елементів ТКМ

Для визначення захищеності ТКМ необхідно розробити математичну модель стану її елементів, на підставі якої можна здійснити прогнозування її станів. Таким чином, необхідно визначитись з набором станів, в яких можуть знаходитися елементи досліджуваної системи, і визначити причини, що викликають переходи між ними. Також необхідно визначити ступінь впливу стану елементів, що складають ТКМ, на стан ТКМ в цілому. Також необхідно визначити метод розрахунку, за допомогою якого здійснюється розрахунок характеристик ТКМ в цілому через характеристики її елементів.

Кожен елемент ТКМ являє собою сукупність певних технічних пристроїв (обладнання). Устаткування елемента ТКМ є відновлювані об'єкти. На рисунку 2 представлений граф станів обладнання, де першому відповідає справний стан об'єкта, другому несправний стан, А. – інтенсивність потоку відмов, μ – інтенсивність потоку відновлень.

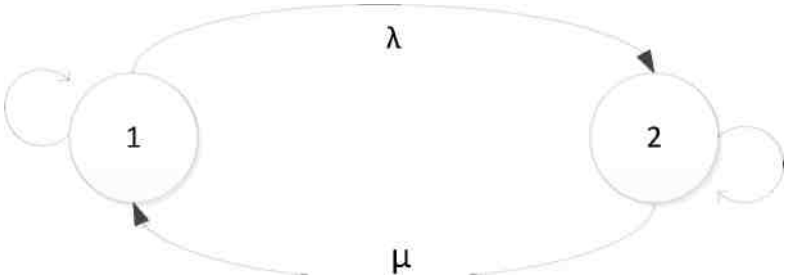


Рис. 2. Граф станів обладнання елемента ТКМ

Коли стан обладнання стабілізовано (воно знаходиться або в справному, або в несправному стані), його поведінку можна прирівняти до поведінки невідновлюваного об'єкта. При виключенні з розгляду часу відновлення пристрою (оскільки в цей час відмова статися не може) відмови формують потік. Відповідно інтенсивність потоку відмов буде розраховуватися за формулою (1):

$$\lambda(t) = \frac{n(t)}{N_{cp} \times \Delta t}, \tag{1}$$

де $n(t)$ – число пристроїв, що знаходяться в непрацездатному стані на інтервалі часу Δt,

Δt – інтервал часу,

N_{cp} – середнє число пристроїв, що знаходяться в працездатному стані на інтервалі часу Δt.

Також інтенсивність потоку відмов можна виразити за допомогою (2) ймовірності безвідмовної роботи і частоти відмов:

$$\lambda(t) = \frac{N_0 \times a(t)}{N_{cp}(t)}, \tag{2}$$

де N_0 – число пристроїв, що знаходяться в працездатному стані на момент початку спостереження,

$a(t)$ – середньостатистична ймовірність знаходження пристрою в непрацездатному стані.

Середньостатистична ймовірність знаходження пристрою в непрацездатному стані визначається за (3):

$$a(\Delta t) = \frac{N(\Delta t) \times \overline{tв}}{N_0 \times \Delta t}, \tag{3}$$

де $N(\Delta t)$ – число пристроїв, що знаходяться в непрацездатному стані в інтервалі часу Δt,

$\overline{tв}$ – середньостатистичний час знаходження пристрою в непрацездатному стані,

N_0 – число пристроїв, що знаходяться в працездатному стані на момент початку спостереження,

Δt – інтервал часу.

Оскільки відмови пристроїв є випадковими подіями і підкоряються експоненціальним законом розподілу, достовірно визначити кількість пристроїв, що знаходяться в працездатному стані в довільний момент часу неможливо. Для цього слід використовувати математичний апарат прогнозування числа (4) пристроїв, що знаходяться в працездатному стані, $N(\Delta t)$ в залежності від середньозваженого часу знаходження пристрою в непрацездатному стані і довжини тимчасового інтервалу.

$$N(\Delta t) = N_0 \times (1 - \frac{n(\Delta t) \times \overline{tв}}{\Delta t}, \tag{4}$$

де $N(\Delta t)$ - число пристроїв, що знаходяться в непрацездатному стані на інтервалі часу Δt,

$\overline{tв}$ – середній час знаходження пристрою в непрацездатному стані,

N_0 – число пристроїв, що знаходяться в працездатному стані на момент початку спостереження,

Δt – інтервал часу.

Для оцінки впливу Кг (коефіцієнт готовності) елементів ТКМ на Кг ТКМ в цілому, побудуємо графіки залежності Кг ТКМ для кожної розглянутої топології. З математичної точки зору ТКМ являє собою сукупність двох видів елементів: вузлів зв'язку та ліній зв'язку. Для визначення впливу виду топології на Кг ТКМ, побудуємо графіки залежності Кг ТКМ від Кг кожного з її елементів. При побудові графіків приймемо Кг одного виду елементів стабілізованою, тобто для оцінки впливу Кг вузла мережі на Кг ТКМ приймемо стабілізованою значення Кг ребра мережі, і відповідно для оцінки впливу Кг ребра мережі на Кг ТКМ, приймемо стабілізованою значення Кг вузла мережі. Побудуємо графік залежності Кг формалізованих топологій кожного виду при стабілізованій Кг ребра мережі. Для аналітичного розрахунку і побудови графіка приймемо Кг вузла зв'язку, що змінюються в діапазоні від 0,99 до 0,9999 з кроком 0,00099. Кг ребра мережі (Кгр) приймемо стабілізованою на значенні 0,999. Результати розрахунку зображені на графіку рис. 3.

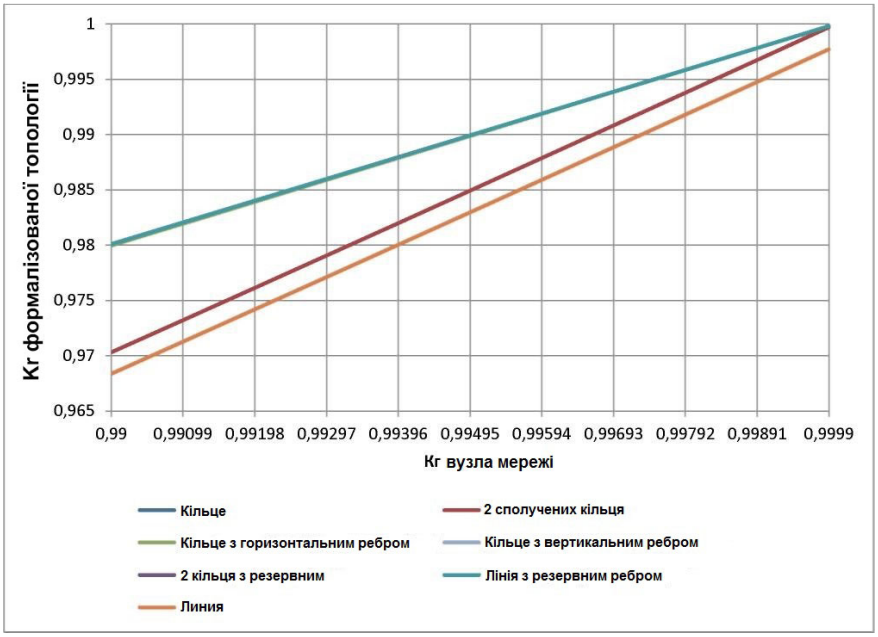


Рис. 3. Графік залежності Кг формалізованих топологій ТКМ від Кг вузла мережі

На графіку рис. 3 наочно доведено, що при низьких значеннях $Кг_у$ при стабілізованому значенні $Кг_р$ Кг лінійної топології з усіма видами резервування практично ідентичні. Топології без повноцінного резервного ребра (лінійна топологія без резервування і з резервуванням тільки ліній зв'язку) не забезпечують достатнього значення Кг сегмента ТКМ.

Проведений аналіз впливу сегментів з резервуванням різної топології на характер убування Кг зі збільшенням довжини ТКМ (числа сегментів). Розрахунки і аналіз отриманих результатів виконані для мережевої топології, зображеної на рис. 3.

Літерами A, B, C, D, E, F, G позначені сегменти топології. Сегменти B, D, A є лінійними топологіями з трьох вузлів, сегменти A, C, E, G є досліджуваний вид топології: кільцеву зображено на рис. 4, кільцеву з зарезервованим вертикальним ребром показано на рис. 5 і кільцеву з зарезервованим горизонтальним ребром зображено на рис. 6.

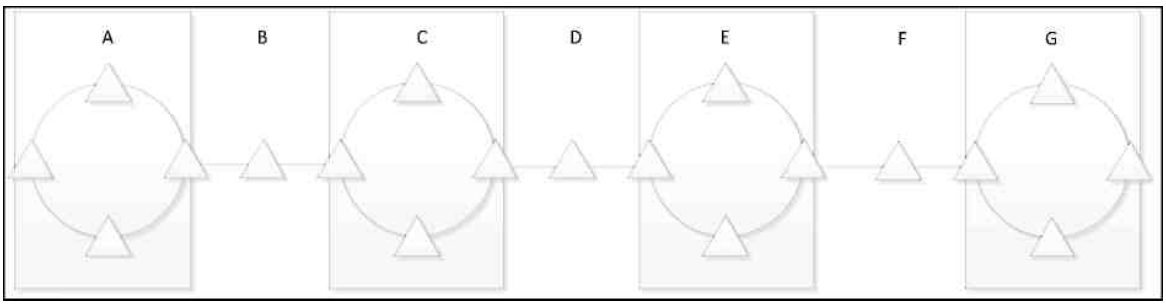


Рис. 4. Неоднорідна топологія з ділянками кільцевої топології без додаткового резервування

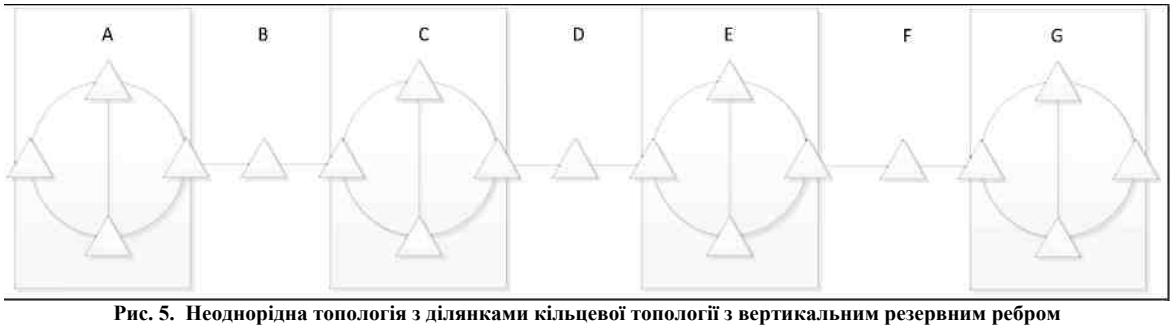


Рис. 5. Неоднорідна топологія з ділянками кільцевої топології з вертикальним резервним ребром

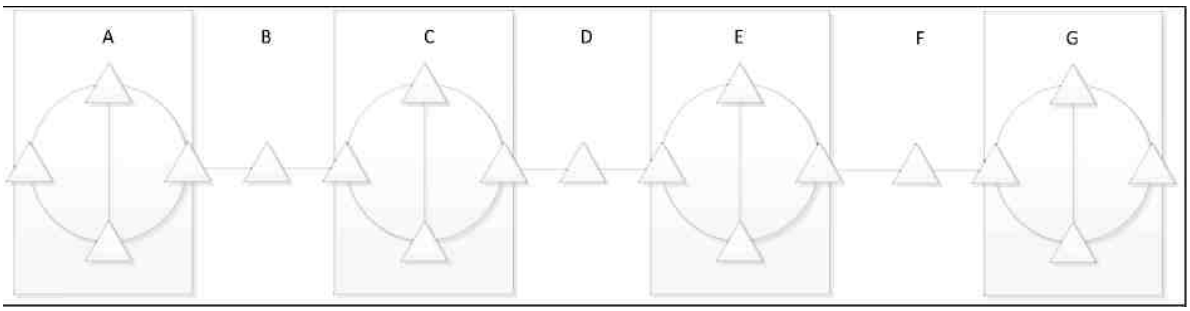


Рис. 6. Неоднорідна топологія з ділянками кільцевої топології з вертикальним резервним ребром

Характер залежності є ламаною лінією, причому найбільший спад Кг відбувається на лінійних ділянках без резервування (B, D, A). Спад Кг на ділянках з зарезервованої топологією набагато менш виражений незалежно від типу резервування. На представленому графіку рис. 7 спостерігається, що Кг топології з кільцевими сегментами помітно нижче, ніж коли зарезервовані сегменти мають кільцеву топологію з резервним ребром. Причому Кг при резервуванні кілець горизонтальними ребрами вище, ніж при резервуванні вертикальними ребрами. Також на рис. 7 науково підтверджується, що чим вище вихідний Кг розглянутого сегмента мережевої топології, тим більше він схильний до зниження при додаванні в ланцюжок додаткових сегментів.

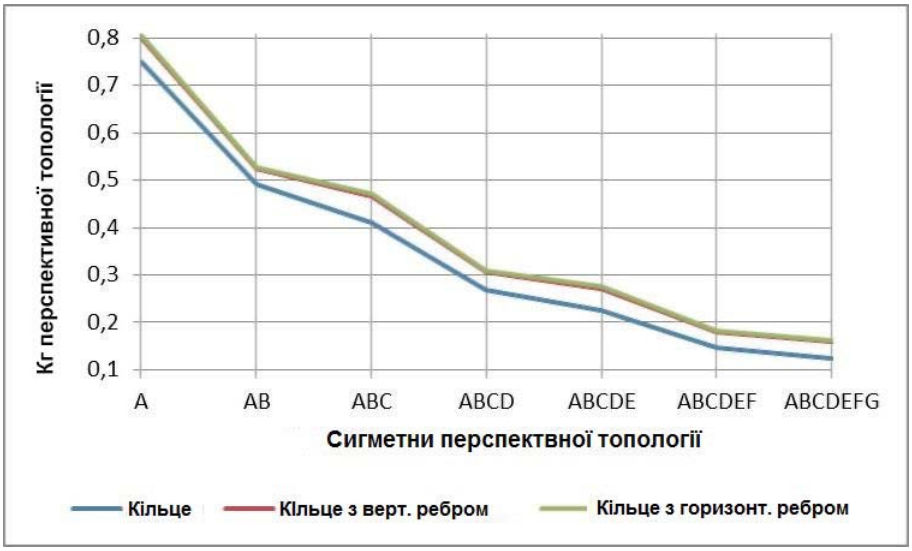


Рис. 7. Вплив типу резервування на Кг неоднорідною топологією при КГЕ л = 0,9

Висновки

В результаті проведеного аналізу можливості застосування математичного і методичного апарату теорії надійності для аналізу структурної надійності складних ТКМ. Як показник ефективності функціонування ТКМ і їх елементів обраний Кг як нормований показник надійності ТКМ і їх елементів. Визначена математична модель, яка описує ймовірність знаходження досліджуваного елемента в працездатному або непрацездатному стані, обумовлених відмовами технічних пристроїв. Виведена розрахункова формула Кг як функції числа відмов і періодів перебування елемента ТКМ в працездатному і непрацездатному стані.

На підставі проведених розрахунків зроблено висновок про можливість впливу на Кг досліджуваних мережевих топологій як за рахунок підвищення Кг складових їх елементів, так і шляхом оптимізації топології за рахунок додавання резервних ребер в різних конфігураціях. Таким чином, обгрунтована можливість підвищення ефективності функціонування ТКМ топологічними методами.

Література

1. Петренко С. Інформаційна безпека: економічні аспекти / С. Петренко, С. Симонов, Р. Кислов // Jet Info, Інформаційний Бюлетень. – 2003. – № 10 (125). – С. 3–24.

2. Методичний документ: Методика визначення загроз безпеки інформації в інформаційних системах [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://fstec.ru/component/attachments/download/812.

3. Шувалов В.П. Забезпечення показників надійності телекомунікаційних систем і мереж / В.П. Шувалов, М.М. Єгунов, Е.А. Мініна Є.М. – Гаряча Лінія – Телеком, 2015. – 168 с.

4. Банк даних загроз безпеки інформації [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://bdu.fstec.ru/documents/files/thrlist.xlsx.

5. Орлов А.І. Експертні оцінки / А.І. Орлов // Журнал «Заводська лабораторія». – 1996. – Т. 62. № 1. – С. 54–60.

6. Агєєв Д.В. Методика опису структури сучасних телекомунікаційних систем з використанням багатошарових графів / Д.В. Агєєв // Східноєвропейський журнал передових технологій. – 2010. – Т. 6 – № 4 (48). – С. 56–59.

7. Касперський К. Техніка мережевих атак / К. Касперський. – М. : СОЛОН-Р, 2001. – 396 с.

8. Романов А.І. Основи теорії телекомунікаційних мереж: навчальний посібник для вузів / О.І. Романов. – К., 2002. – 152 с.

References

1. Petrenko S. Informatsiina bezpeka: ekonomichni aspekty / S. Petrenko, S. Symonov, R. Kyslov // Jet Info, Informatsiinyi Biuleten. – 2003. – Issue 10 (125). – S. 3–24.

2. Metodychnyi dokument: Metodyka vyznachennia zahroz bezpeky informatsii v informatsiinykh systemakh [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://fstec.ru/component/attachments/download/812.

3. Shuvalov V.P. Zabezpechennia pokaznykiv nadiinosti telekomunikatsiinykh system i merezh / V.P. Shuvalov, M.M. Yehunov, E.A. Minina Ye.M. – Hariacha Liniia – Telekom, 2015. – 168 s.

4. Bank danykh zahroz bezpeky informatsii [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://bdu.fstec.ru/documents/files/thrlist.xlsx.

5. Orlov A.I. Ekspertni otsinky / A.I. Orlov // Zhurnal «Zavodska laboratoriia». – 1996. – T. 62. Issue 1. – S. 54–60.

6. Ahieiev D.V. Metodyka opysu struktury suchasnykh telekomunikatsiinykh system z vykorystanniam bahatosharovykh hrafiv / D.V. Ahieiev // Skhidnoievropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii. – 2010. – T. 6 – Issue 4 (48). – S. 56–59.

7. Kasperskyi K. Tekhnika merezhevykh atak / K. Kasperskyi. – M. : SOLON-R, 2001. – 396 s.

8. Romanov A.I. Osnovy teorii telekomunikatsiinykh merezh: navchalnyi posibnyk dlia vuziv / O.I. Romanov. – K., 2002. – 152 s.

Рецензія/Peer review : 13.10.2017 р. Надрукована/Printed :02.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н. проф. Сорокатий Р.В.

УДК 004.891.3: 004.3

Т. О. ГОВОРУЩЕНКО, О. В. ПОМОРОВА
Хмельницький національний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОЦІНЮВАННЯ ДОСТАТНОСТІ ІНФОРМАЦІЇ ЩОДО ЯКОСТІ У СПЕЦИФІКАЦІЯХ ВИМОГ ДО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Метою даного дослідження є розроблення моделей процесу оцінювання достатності інформації для визначення якості програмного забезпечення на основі стандарту ISO 25010:2011, моделей процесу оцінювання достатності інформації для визначення якості та складності програмного забезпечення з використанням результатів метричного аналізу, моделі процесу оцінювання результатів проектування та прогнозування характеристик програмного забезпечення на основі штучної нейронної мережі. Розроблені моделі дають можливість відобразити особливості процесу оцінювання достатності інформації щодо якості у специфікації вимог до ПЗ, формалізувати процес оцінювання достатності інформації щодо якості у специфікації вимог до ПЗ, а також забезпечують теоретичне підґрунтя для розроблення методів та засобів оцінювання достатності інформації щодо якості у специфікаціях вимог до ПЗ.

Ключові слова: програмне забезпечення (ПЗ), специфікація вимог до ПЗ, якість програмного забезпечення, достатність інформації, онтологія, штучна нейронна мережа (ШНМ).

T. O. HOVORUSHCHENKO, O. V. POMOROVA
Khmelnytskyi National University

MODELLING OF THE PROCESS OF EVALUATING THE SUFFICIENCY OF THE INFORMATION ON QUALITY IN THE SOFTWARE REQUIREMENTS SPECIFICATIONS

The aim of this study is the development of: the models of the process of evaluating the sufficiency of information for the software quality assessment on the basis of ISO 25010: 2011, the models of the process of evaluating the sufficiency of information for the software quality and complexity assessment using the metric analysis results, the model of the process of evaluating the design results and predicting the software characteristics based on artificial neural network. The developed models models of the software quality by ISO 25010 and the models of the software quality and complexity using metric analysis results based on ontologies and weighted ontologies provide the modelling the process of evaluating the sufficiency of the information on quality in the software requirements specifications. The developed information models of the process of evaluating the sufficiency of the information for determining the software quality by ISO 25010:2011 and for determining the software quality and complexity using the results of metric analysis reflect the peculiarities of the process of evaluating the sufficiency of the information on quality in the software requirements specifications of, and the relationship between software quality models based on ISO 25010 on the basis of ontologies, between software quality and complexity models using the metric analysis results based on ontologies. The developed models of the process of evaluating the sufficiency of the information for determining the software quality by ISO 25010:2011 and for determining the software quality and complexity using metric analysis results formalize the process of evaluating the sufficiency of the information on quality in the software requirements specifications and provide the theoretical basis for the development of the methodology of evaluating the sufficiency of the information on quality in the software requirements specifications. The proposed concept of evaluating the design results and predicting the software characteristics provided the possibility to develop the model of the process of evaluating the design results and predicting the software characteristics based on artificial neural network. The developed model of the process of evaluating the design results and predicting the software characteristics based on ANN differs from the known models because it provides to take into account the weights and interactions of the quality and complexity software metrics within each characteristic of the software, and to estimate the total impact of metrics on the software characteristics (software project quality and complexity, predicted quality and complexity of software).

Keywords: software, software requirements specification (SRS), software quality, sufficiency of information, ontology, artificial neural network (ANN).

Вступ

Практично усі сфери людської діяльності на сьогодні пов’язані з інформаційними системами, основою яких є програмне забезпечення (ПЗ). Ключовим фактором забезпечення ефективного застосування програмних продуктів та однією із основних потреб замовників є досягнення високих значень показників якості ПЗ.

Як показує статистика [1–5], наразі існують проблеми у галузі забезпечення якості ПЗ. Причому велика кількість помилок ПЗ виникає на етапі формування та формулювання вимог – такі помилки становлять 10–23% всіх помилок. Переважна більшість аварій, пов’язаних із ПЗ, виникли через помилкові вимоги, а не через помилки кодування [5]. Чим раніше буде виявлено відповідний дефект (помилка, порушення, недолік, несправність), тим дешевше обійдеться його виправлення [6].

В процесі формування та формулювання вимог відбуваються інформаційні втрати через неповне та різне розуміння потреб та контексту інформації – особливо такі втрати суттєві для програмних проектів, які розробляються на стику предметних галузей (наприклад, ПЗ для медицини), коли враховувати потрібно як стандарти щодо розроблення ПЗ, так і стандарти предметної галузі, для якої розробляється ПЗ. Таку кількість стандартів важко імплементувати, а ще важче верифікувати ступінь врахування рекомендацій цих стандартів.

Програмні проекти з неповними вимогами та специфікаціями не можуть мати успішної реалізації [7]. За таких умов актуальним і дуже важливим є аналіз специфікації вимог до ПЗ, можливість «відсікти» програмні проекти з неповною (з недостатньою інформацією) специфікацією. Достатність інформації є

одним з найважливіших аспектів оцінювання якості програмного забезпечення. Якість та успішність реалізації програмного проекту суттєво залежать від специфікації вимог, а також від достатності наявної у ній інформації як наявності всіх інформаційних елементів (даних), необхідних для визначення якості ПЗ. Неповнота, неточність та спотворення інформації специфікації вимог до ПЗ призводять, відповідно, до зменшення достовірності оцінок якості ПЗ, а також до збільшення прогалини в знаннях про програмне забезпечення, що спричиняє виникнення непрогнозованих емерджентних властивостей програмних систем.

Сьогодні оцінювання якості ПЗ за стандартом ISO 25010:2011 [8] відбувається так: на основі атрибутів якості, зазначених у ISO 25023:2016 [9], оцінюються підхарактеристики та характеристики якості, які, в свою чергу, надають комплексну оцінку якості ПЗ. Оцінювання ж якості та складності ПЗ на основі використання результатів метричного аналізу відбувається так: на основі показників розраховуються значення метрик якості та складності, які, в свою чергу, надають комплексну оцінку якості та складності ПЗ [10]. Тоді атрибути якості, а також показники якості та складності ПЗ, визначені у специфікації вимог, становлять *інформацію щодо якості* специфікації вимог до ПЗ. Під *достатністю інформації щодо якості* у специфікації вимог до ПЗ будемо розуміти наявність у специфікації всіх інформаційних елементів (атрибутів та показників), необхідних для визначення якості ПЗ. Якщо деякі атрибути та (або) показники відсутні, то у специфікації вимог недостатньо інформації для визначення якості ПЗ, і розробники повинні внести необхідні доповнення у специфікацію.

Тоді *актуальною задачею* є задача оцінювання достатності інформації щодо якості у специфікації вимог до ПЗ (як наявності атрибутів та (або) показників якості ПЗ у специфікації вимог).

Проведений аналіз стандартів ISO 25010 [8], ISO 25023 [9] показав, що вони представлені природною мовою у текстовій формі, тому відсутній механізм верифікації результатів імплементації цих стандартів у процес розроблення ПЗ. Було встановлено, що інформацію щодо якості зручно подавати у вигляді онтологій, що дозволяють відобразити причинно-наслідкові зв'язки між поняттями.

Аналіз відомих моделей в галузі інженерії інформаційних систем та програмного забезпечення показав, що наразі розроблено моделі профілю при сертифікації ПЗ [11], онтологічні моделі інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень [12], моделі для єдиного когерентного підґрунтя стандартів ISO/IEC JTC1/SC7 [13, 14], моделі доменної онтології для ISO 24744 [15] і для аналізу ПЗ та засобів реінжинірингу [16], модель для опису та визначення предметних і операційних знань щодо забезпечення якості ПЗ [17]. Але наразі відсутні моделі процесу оцінювання достатності інформації для визначення якості програмного забезпечення, а також моделі процесу оцінювання результатів проектування та прогнозування характеристик ПЗ.

Тому *метою даного дослідження* є розроблення: моделей процесу оцінювання достатності інформації для визначення якості програмного забезпечення на основі стандарту ISO 25010:2011, моделей процесу оцінювання достатності інформації для визначення якості та складності програмного забезпечення з використанням результатів метричного аналізу, моделі процесу оцінювання результатів проектування та прогнозування характеристик програмного забезпечення на основі штучної нейронної мережі.

Моделі процесу оцінювання достатності інформації для визначення якості програмного забезпечення на основі стандарту ISO 25010:2011

Якість ПЗ (Q), згідно зі стандартом [8], є функцією від восьми основних характеристик якості. Тоді множина характеристик якості ПЗ: $QCH = \{qch_1, ..., qch_8\}$. Кожна з основних характеристик якості є функцією від декількох підхарактеристик якості. Множина підхарактеристик якості ПЗ має вигляд: $QSCH = \{qsch_1, ..., qsch_{31}\}$. Водночас, кожна підхарактеристика якості ПЗ є функцією певних атрибутів якості ПЗ, описаних у стандарті [9]. Множина атрибутів якості ПЗ, згідно зі стандартом [9], має вигляд $QMS = \{qms_1, ..., qms_{138}\}$, оскільки аналіз атрибутів дав можливість визначити залежність підхарактеристик якості від 138 різних атрибутів (всього від 203 атрибутів). Тоді якість ПЗ може бути виражена не тільки функцією від підхарактеристик якості, але й середнім зваженим арифметичним показником з урахуванням значень атрибутів та коефіцієнтів їхньої вагомості.

Отже, необхідним є обчислення вагових коефіцієнтів атрибутів якості ПЗ. Оскільки характеристики та підхарактеристики якості ПЗ корелюють за атрибутами, то при обчисленні вагових коефіцієнтів атрибутів варто враховувати існування таких взаємозв'язків. Цінними при виявленні спільних атрибутів є знання досвідчених фахівців щодо взаємовпливу та кореляції характеристик, підхарактеристик та атрибутів якості ПЗ, тому їх варто зберігати та використовувати. У якості засобу відображення цих знань обрано онтології.

Модель якості ПЗ за стандартом ISO 25010:2011 на основі онтології має вигляд: $O_Q =< X_Q, RX_Q, F_Q >$, де X_Q – скінченна множина характеристик, підхарактеристик та атрибутів якості ПЗ, RX_Q – скінченна множина відношень між поняттями, F_Q – скінченна множина функцій інтерпретації, заданих для характеристик, підахарактеристик та атрибутів якості ПЗ.

Множина характеристик, підхарактеристик та атрибутів якості ПЗ: $X_Q = \{QCH, QSCH, QMS\} = \{x_Q^1, ..., x_Q^{177}\}$, де: $\{x_Q^1, ..., x_Q^8\} \in QCH$, $\{x_Q^9, ..., x_Q^{39}\} \in QSCH$, $\{x_Q^{40}, ..., x_Q^{177}\} \in QMS$. Множина відношень між поняттями RX_Q складається з відношення «залежить від»,

тобто $RX_Q = \{"depends\ on"\}$. Множина F_Q функцій інтерпретації, заданих для характеристик, підхарактеристик та атрибутів якості ПЗ, складається з функцій залежності якості від характеристик, характеристик від підхарактеристик, підхарактеристик від атрибутів якості, тобто $F_Q = \{f_Q^1,...,f_Q^{40}\} = \{f(), f_1(),..., f_8(), \phi_1(),..., \phi_{31}()\}$.

Тоді *базова (універсальна) модель предметної галузі «Інженерія програмного забезпечення» (частина «Якість ПЗ»)) на основі онтології* має вигляд [18, 19]:

$$O_Q = \left\{qch_1,...,qch_8, qsch_1,...,qsch_{31}, qms_1,...,qms_{138}, "depends\ on", f(), f_1(),..., f_8(), \phi_1(),..., \phi_{31}()\right\}. \quad (1)$$

Оскільки необхідним є врахування вагових коефіцієнтів атрибутів якості ПЗ, то є потреба внесення таких вагових коефіцієнтів у базову (універсальну) модель предметної галузі «Інженерія програмного забезпечення» (частина «Якість ПЗ») та побудови зваженої онтології.

Тоді множина характеристик, підхарактеристик та атрибутів якості ПЗ для моделі якості ПЗ за стандартом ISO 25010:2011 на основі зваженої онтології матиме наступний вигляд: $X_{Qw} = \{x_{Qw}^1,...,x_{Qw}^{177}\}$, де: $\{x_{Qw}^1,...,x_{Qw}^8\} \in QCH$, $\{x_{Qw}^9,...,x_{Qw}^{39}\} \in QSCH$, $\{x_{Qw}^{40},...,x_{Qw}^{177}\} = \{(qms_1, w_1^m),...,(qms_{138},..., w_{138}^m)\}$, тобто підмножина $\{x_{Qw}^{40},...,x_{Qw}^{177}\}$ складається з пар (qms_i, w_i^m), де qms_i – i-й атрибут якості ПЗ ($qms_i \in QMS$), w_i^m – ваговий коефіцієнт i-го атрибуту якості ПЗ, $i = \overline{1,\ 138}$.

Базова (універсальна) модель предметної галузі «Інженерія програмного забезпечення» (частина «Якість ПЗ»)) на основі зваженої онтології матиме наступний вигляд:

$$O_Q^w = \left\{\begin{matrix} qch_1,...,qch_8, qsch_1,...,qsch_{31}, (qms_1, w_1^m),...,(qms_{138},..., w_{138}^m), \\ "depends\ on", f(), f_1(),..., f_8(), \phi_1(),..., \phi_{31}() \end{matrix}\right\}. \quad (2)$$

Модель якості конкретного програмного продукту на основі онтології має вигляд [18, 19] (ця онтологія наповнюватиметься на основі інформації, взятої зі специфікації вимог до конкретного ПЗ):

$$O_Q^{real} = \left\{qch_1,...,qch_{nch}, qsch_1,...,qsch_{nsch}, qms_1,...,qms_{nm}, "depends\ on", f(), f_1(),..., f_8(), \phi_1(),..., \phi_{31}()\right\}, \quad (3)$$

де nch ($nch \le 8$) – кількість характеристик якості ПЗ, які можна обчислити на основі наявних у специфікації вимог до конкретного ПЗ атрибутів якості, $nsch$ ($nsch \le 31$) – кількість підхарактеристик якості ПЗ, які можна обчислити на основі наявних у специфікації вимог до конкретного ПЗ атрибутів якості, nm ($nm \le 138$) – кількість атрибутів якості, наявних у специфікації вимог до конкретного ПЗ. Онтологія (онтологічна база знань), яка розробляється за моделлю (3), наповнюється на основі інформації, взятої зі специфікації вимог до конкретного ПЗ.

Враховуючи розроблені базову (універсальну) модель предметної галузі «Інженерія програмного забезпечення» (частина «Якість ПЗ») на основі онтології та на основі зваженої онтології, базову (універсальну) модель предметної галузі «Інженерія програмного забезпечення» (частина «Якість ПЗ») на основі зваженої онтології, а також модель якості конкретного програмного забезпечення на основі онтології, представлені формулами (1)-(3), розробимо моделі процесу оцінювання достатності інформації для визначення якості ПЗ на основі стандарту ISO 25010:2011.

Процес оцінювання достатності інформації для визначення якості ПЗ полягає у:

1) порівнянні онтології для визначення якості конкретного ПЗ з базовою (універсальною) онтологією з метою виявлення атрибутів, відсутніх в онтології для визначення якості конкретного ПЗ, тобто відсутніх у специфікації вимог до ПЗ, за якою ця онтологія була побудована, а також виявлення характеристик та підхрактеристик якості ПЗ, які неможливо обчислити на основі наявних у специфікації вимог до конкретного ПЗ атрибутів;

2) формуванні висновку про недостатність інформації щодо якості у специфікації вимог до конкретного ПЗ, якщо встановлено атрибути, відсутні у специфікації вимог до ПЗ, а також характеристики та підхарактеристики якості ПЗ, які неможливо обчислити на основі наявних атрибутів у специфікації вимог до конкретного ПЗ;

3) порівнянні онтології для визначення якості конкретного ПЗ зі зваженою базовою (універсальною) онтологією, якщо було сформовано висновок про недостатність інформації, – з метою встановлення вагових коефіцієнтів атрибутів, відсутніх у специфікації вимог до конкретного ПЗ, для подальшого визначення пріоритетності доповнення атрибутів у специфікацію вимог до ПЗ.

Тоді *модель процесу оцінювання достатності інформації для визначення якості ПЗ за стандартом ISO 25010:2011 на основі онтологій* подамо у вигляді:

$$\begin{cases} SMIQ = O_Q \setminus O_Q^{real}; \\ if\ \{qch_1,...,qch_{(8-nch)}, qsch_1,...,qsch_{(31-nsch)}, qms_1,...,qms_{(138-nm)}\} = \varnothing \\ then\ "SRS\ information\ is\ sufficient" \\ else:\ "SRS\ information\ is\ insufficient", \\ SMMW = O_Q^w \setminus O_Q^{real} \end{cases}, \quad (4)$$

де $SMIQ = \{qch_1,...,qch_{(8-nch)}, qsch_1,...,qsch_{(31-nsch)}, qms_1,...,qms_{(138-nm)}\}$, $\{qch_1,...,qch_{(8-nch)}\}$ – підмножина характеристик якості ПЗ, які неможливо обчислити на основі наявних у специфікації вимог до конкретного ПЗ атрибутів якості; $\{qsch_1,...,qsch_{(31-nsch)}\}$ – підмножина підхарактеристик якості ПЗ, які неможливо обчислити на основі наявних у специфікації вимог до конкретного ПЗ атрибутів якості; $\{qms_1,...,qms_{(138-nm)}\}$ – підмножина атрибутів, відсутніх у специфікації вимог до конкретного ПЗ; $SMMW = \{(qms_1, w_1^m),...,(qms_{(138-nm)},..., w_{(138-nm)}^m)\}$ – підмножина атрибутів, відсутніх у специфікації вимог до конкретного ПЗ, та їхніх вагових коефіцієнтів.

Інформаційна модель процесу оцінювання достатності інформації для визначення якості ПЗ на основі стандарту ISO 25010:2011 представлена на рис. 1.

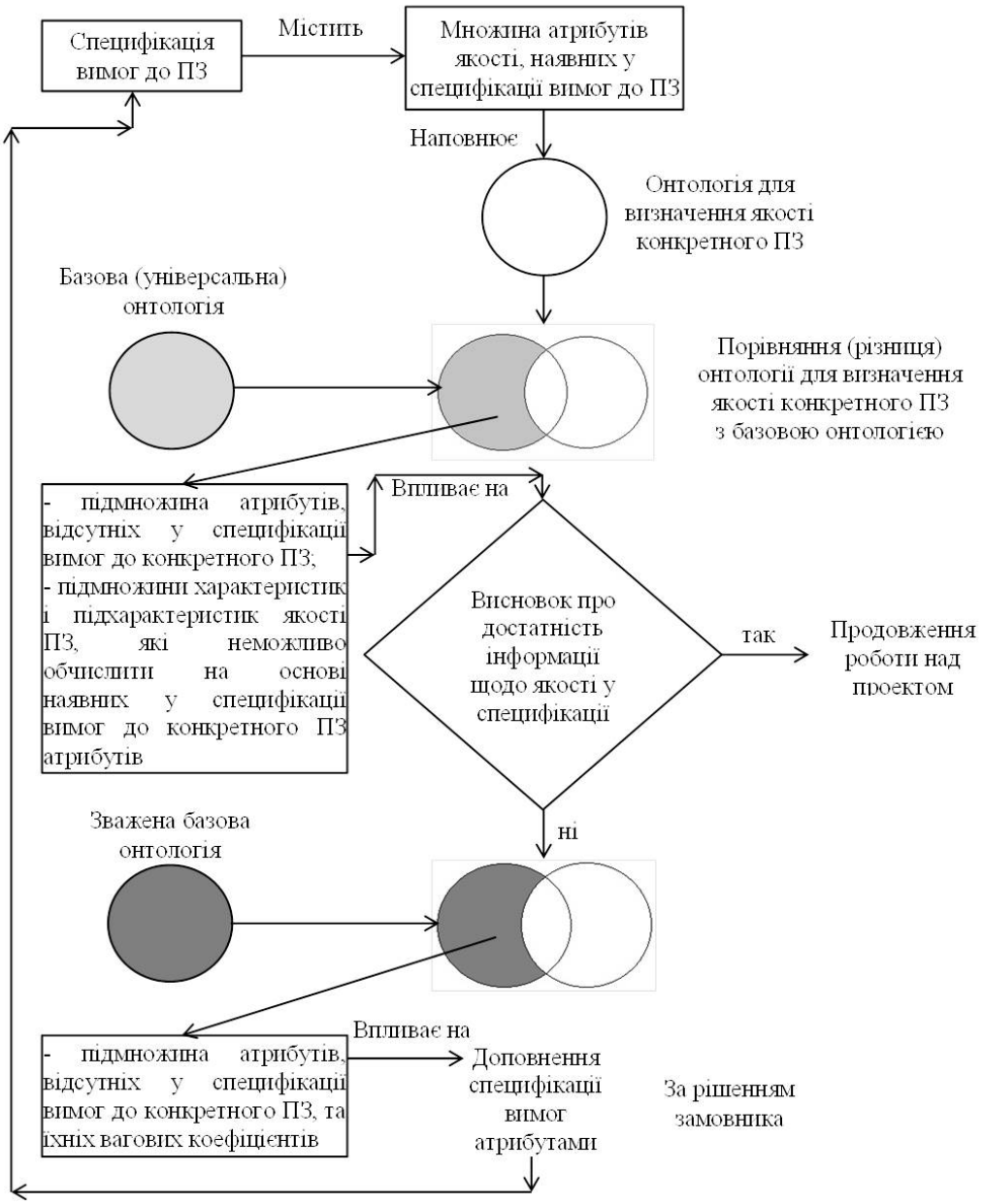


Рис. 1. Інформаційна модель процесу оцінювання достатності інформації для визначення якості ПЗ на основі стандарту ISO 25010:2011

Розроблені моделі процесу оцінювання достатності інформації для визначення якості ПЗ за стандартом ISO 25010:2011 відображають особливості оцінювання достатності інформації для визначення якості ПЗ за стандартом ISO 25010:2011, забезпечують адаптацію до особливостей предметної галузі та надають можливість доступу, аналізу та розуміння інформації не лише людиною, але й віртуальними агентами (ботами), а також є теоретичним підґрунтям для розроблення методів та засобів оцінювання достатності інформації щодо якості у специфікаціях вимог до ПЗ.

Моделі процесу оцінювання достатності інформації для визначення якості та складності програмного забезпечення з використанням результатів метричного аналізу

У [18] було доведено, що якість ПЗ на етапі проектування архітектури (QDS) залежить від 14 метрик ($\{sqm_1,...,sqm_{14}\}$), а складність ПЗ на етапі проектування архітектури ($CXDS$) залежить від 10 метрик з точними або прогнозованими значеннями ($\{scxm_1,...,scxm_{10}\}$). Множину метрик якості ПЗ на етапі проектування архітектури можна представити також у вигляді $SQM=\{SQM_{exv},SQM_{prv}\}$, де SQM_{exv} – підмножина метрик якості з точними значеннями на етапі проектування архітектури, SQM_{prv} – підмножина метрик якості з прогнозованими значеннями на етапі проектування архітектури. Множину метрик складності ПЗ на етапі проектування архітектури можна представити також у вигляді $SCXM=\{SCXM_{exv},SCXM_{prv}\}$, де $SCXM_{exv}$ – підмножина метрик складності з точними значеннями на етапі проектування архітектури, $SCXM_{prv}$ – підмножина метрик складності з прогнозованими значеннями на етапі проектування архітектури. Кожна з зазначених метрик є функцією від декількох показників [18], причому метрики якості та складності залежать всього від 72 показників, але від 42 різних показників, тоді множина показників якості та складності ПЗ для подальшого метричного аналізу має вигляд $SQCXI=\{sqcxi_1,...,sqcxi_{42}\}$.

Модель якості та складності програмного забезпечення з використанням результатів метричного аналізу на основі онтології має вигляд: $O_{metr}=<X_{metr},RX_{metr},F_{metr}>$, де X_{metr} – скінченна множина метрик і показників якості та складності ПЗ, RX_{metr} – скінченна множина відношень між поняттями, F_{metr} – скінченна множина функцій інтерпретації, заданих для метрик і показників якості та складності ПЗ.

Множина метрик і показників якості та складності ПЗ: $X_{metr}=\{SQM,SCXM,SQCXI\}=\{x^1_{metr},...,x^{66}_{metr}\}$, де: $\{x^1_{metr},...,x^{14}_{metr}\}\in SQM$ (причому $\{x^1_{metr},...,x^5_{metr}\}\in SQM_{exv}$, $\{x^6_{metr},...,x^{14}_{metr}\}\in SQM_{prv}$), $\{x^{15}_{metr},...,x^{24}_{metr}\}\in SCXM$ (причому $\{x^{15}_{metr},...,x^{18}_{metr}\}\in SCXM_{exv}$, $\{x^{19}_{metr},...,x^{24}_{metr}\}\in SCXM_{prv}$), $\{x^{25}_{metr},...,x^{66}_{metr}\}\in SQCXI$. Множина відношень між поняттями RX_{metr} складається з відношення «залежить від», тобто $RX_{metr}=\{"depends\ on"\}$. Множина F_{metr} функцій інтерпретації, заданих для якості ПЗ, складається з функцій залежності якості від метрик якості, метрик від показників якості, тобто $F_{metr}=\{f^1_{metr},...,f^{26}_{metr}\}=\{\psi(),\psi_1(),...,\psi_{14}(),\varphi(),\varphi_1(),...,\varphi_{10}()\}$.

Тоді базова (універсальна) модель для визначення якості та складності програмного забезпечення з використанням результатів метричного аналізу на основі онтології має вигляд [18, 20]:

$$O_{metr}=\begin{Bmatrix} sqm_1,...,sqm_{14},scxm_1,...,scxm_{10},sqcxi_1,...,sqcxi_{42},\\ "depends\ on",\psi(),\psi_1(),...,\psi_{14}(),\varphi(),\varphi_1(),...,\varphi_{10}() \end{Bmatrix}. \quad (5)$$

Оскільки необхідним є врахування вагових коефіцієнтів показників якості та складності ПЗ, то є потреба внесення таких вагових коефіцієнтів у базову (універсальну) модель для визначення якості та складності ПЗ з використанням результатів метричного аналізу та побудови зваженої онтології. Тоді множина метрик і показників якості та складності ПЗ моделі для визначення якості та складності ПЗ з використанням результатів метричного аналізу на основі зваженої онтології матиме наступний вигляд: $X_{metrw}=\{x^1_{metrw},...,x^{38}_{metrw}\}$, де: $\{x^1_{metrw},...,x^{14}_{metrw}\}\in SQM$, $\{x^{15}_{metrw},...,x^{24}_{metrw}\}\in SCXM$, $\{x^{25}_{metr},...,x^{66}_{metr}\}=\{(sqcxi_1,w^{ind}_1),...,(sqcxi_{42},w^{ind}_{42})\}$, тобто підмножина $\{x^{25}_{metr},...,x^{66}_{metr}\}$ складається з пар $(sqcxi_i,w^{ind}_i)$, де $sqcxi_i$ – i-й показник якості та складності ПЗ ($sqcxi_i\in SQCXI$), w^{ind}_i – ваговий коефіцієнт i-го показника, $i=\overline{1,\ 42}$.

Базова (універсальна) модель для визначення якості та складності програмного забезпечення з використанням результатів метричного аналізу на основі зваженої онтології матиме наступний вигляд:

$$O^w_{metr}=\begin{Bmatrix} sqm_1,...,sqm_{14},scxm_1,...,scxm_{10},(sqcxi_1,w^{ind}_1),...,(sqcxi_{42},w^{ind}_{42}),\\ "depends\ on",\psi(),\psi_1(),...,\psi_{14}(),\varphi(),\varphi_1(),...,\varphi_{10}() \end{Bmatrix}. \quad (6)$$

Модель для визначення якості та складності конкретного програмного продукту з використанням

результатів метричного аналізу на основі онтології має вигляд [18, 20]:

$$O_{metr}^{real} = \begin{Bmatrix} sqm_1,...,sqm_{nqm}, scxm_1,...,scxm_{ncxm}, sqcxi_1,...,sqcxi_{nqcxi}, \\ "depends\ on", \psi(), \psi_1(),..., \psi_{14}(), \varphi(), \varphi_1(),..., \varphi_{10}() \end{Bmatrix}, \quad (7)$$

де nqm ($nqm \le 14$) – кількість метрик якості ПЗ, які можна обчислити на основі наявних у специфікації вимог до конкретного ПЗ показників, $ncxm$ ($ncxm \le 10$) – кількість метрик складності ПЗ, які можна обчислити на основі наявних у специфікації вимог до конкретного ПЗ показників, $nqcxi$ ($nqcxi \le 42$) – кількість показників якості та складності, наявних у специфікації вимог до конкретного ПЗ. Онтологія (онтологічна база знань), яка розроблятиметься за моделлю (7), наповнюватиметься на основі інформації, взятої зі специфікації вимог до конкретного ПЗ.

Враховуючи розроблені базові (універсальні) моделі для визначення якості та складності ПЗ з використанням результатів метричного аналізу на основі онтології та на основі зваженої онтології, а також модель для визначення якості та складності конкретного ПЗ з використанням результатів метричного аналізу на основі онтології, представлені формулами (5)–(7), розробимо моделі процесу оцінювання достатності інформації для визначення якості та складності ПЗ з використанням результатів метричного аналізу.

Процес оцінювання достатності інформації для визначення якості та складності ПЗ з використанням результатів метричного аналізу полягає у:

1) порівнянні онтології для визначення якості та складності конкретного ПЗ з використанням результатів метричного аналізу з базовою (універсальною) онтологією з метою виявлення показників, відсутніх в онтології для визначення якості та складності конкретного ПЗ, тобто відсутніх у специфікації вимог до ПЗ, за якою ця онтологія була побудована, а також виявлення метрик якості та складності ПЗ, які неможливо обчислити на основі наявних у специфікації вимог до конкретного ПЗ показників;

2) формуванні висновку про недостатність інформації щодо якості у специфікації вимог до конкретного ПЗ, якщо встановлено показники, відсутні у специфікації вимог до ПЗ, а також метрики якості та складності ПЗ, які неможливо обчислити на основі наявних показників у специфікації вимог до конкретного ПЗ;

3) порівнянні онтології для визначення якості та складності конкретного ПЗ зі зваженою базовою (універсальною) онтологією, якщо було сформовано висновок про недостатність інформації, – з метою встановлення вагових коефіцієнтів показників, відсутніх у специфікації вимог до конкретного ПЗ, для подальшого визначення пріоритетності доповнення таких показників у специфікацію вимог до ПЗ.

Тоді *модель процесу оцінювання достатності інформації для визначення якості та складності ПЗ з використанням результатів метричного аналізу на основі онтологій* може бути представлена у наступному формалізованому вигляді:

$$\begin{cases} SMIQM = O_{metr} \setminus O_{metr}^{real}; \\ if\ \{sqm_1,...,sqm_{(14-nqm)}, scxm_1,...,scxm_{(10-ncxm)}, sqcxi_1,...,sqcxi_{(42-nqcxi)}\} = \varnothing \\ then\ "SRS\ information\ is\ sufficient" \\ else:\ "SRS\ information\ is\ insufficient", \\ SMIW = O_{metr}^{w} \setminus O_{metr}^{real} \end{cases}, \quad (8)$$

де $SMIQM = \{sqm_1,...,sqm_{(14-nqm)}, scxm_1,...,scxm_{(10-ncxm)}, sqcxi_1,...,sqcxi_{(42-nqcxi)}\}$, $\{sqm_1,...,sqm_{(14-nqm)}\}$ – підмножина метрик якості ПЗ, які неможливо обчислити на основі наявних показників у специфікації вимог до конкретного ПЗ; $\{scxm_1,...,scxm_{(10-ncxm)}\}$ – підмножина метрик складності ПЗ, які неможливо обчислити на основі наявних показників у специфікації вимог до конкретного ПЗ; $\{sqcxi_1,...,sqcxi_{(42-nqcxi)}\}$ – підмножина показників, відсутніх у специфікації вимог до конкретного ПЗ; $SMIW = \{(sqcxi_1, w_1^{ind}),...,(sqcxi_{(42-nqcxi)}, w_{(42-nqcxi)}^{ind})\}$ – підмножина показників, відсутніх у специфікації вимог до конкретного ПЗ, та їхніх вагових коефіцієнтів.

Інформаційна модель процесу оцінювання достатності інформації для визначення якості та складності ПЗ з використанням результатів метричного аналізу представлена на рис. 2.

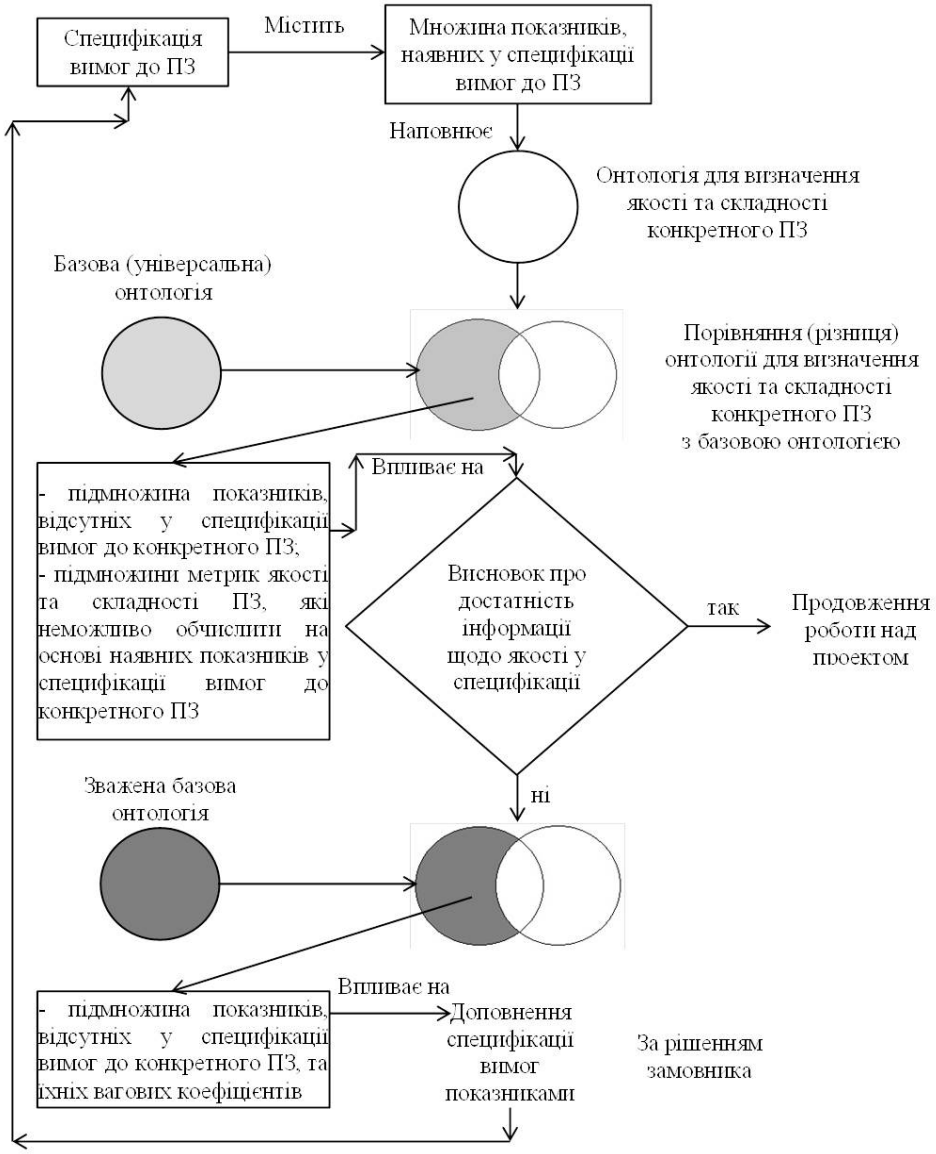


Рис. 2. Інформаційна модель процесу оцінювання достатності інформації для визначення якості та складності ПЗ з використанням результатів метричного аналізу

Розроблені моделі процесу оцінювання достатності інформації для визначення якості та складності ПЗ з використанням результатів метричного аналізу призначені для підтримки процесу оцінювання якості ПЗ на ранніх етепах життєвого циклу, забезпечують висновок про достатність інформації щодо якості у специфікації вимог та множину показників, які необхідно доповнити у специфікацію в разі недостатності інформації, а також є теоретичним підґрунтям для розроблення методів та засобів оцінювання достатності інформації щодо якості у специфікаціях вимог до ПЗ.

Модель процесу оцінювання результатів проектування та прогнозування характеристик програмного забезпечення на основі штучної нейронної мережі

Для оцінювання і прогнозування складності та якості ПЗ на основі метричного аналізу потрібно розв’язати завдання визначення взаємозв'язку між значеннями метрик та такими характеристиками, як якість і складність проекту ПЗ, а також прогнозована складність та якість розробленого ПЗ. Отже, для розв’язання задачі оцінювання результатів проектування та прогнозування характеристик якості програмного забезпечення на основі метричного аналізу потрібно розв’язати системи рівнянь, представлені у [18, 20], для яких невідомими є функції залежності якості та складності ПЗ від метрик, які за кількісними оцінками метрик якості та складності ПЗ надаватимуть коректну кількісну оцінку якості та складності ПЗ.

Універсальними структурами, що забезпечують можливість розв’язати задачу представлення функції довільного вигляду, узагальнити інформацію та виявити залежності між вхідними і результуючими даними, є штучні нейронні мережі (ШНМ), отже, для реалізації вище зазначених систем рівнянь буде використовуватись саме ШНМ. Тоді слід розробити ШНМ, яка опрацьовуватиме множини показників специфікації, здійснюватиме апроксимацію показників та надаватиме прогнозовані оцінки характеристик програмного проекту.

Для формування вхідних даних ШНМ знадобляться множина метрик етапу проектування

архітектури з точними значеннями (множина $TMP = \{tmp_e \mid e = 1..9\} = (SQM_{exv} \cup SCXM_{exv})$) та множина метрик етапу проектування архітектури з прогнозованими значеннями (множина $PMP = \{pmp_l \mid l = 1..15\} = (SQM_{prv} \cup SCXM_{prv})$), які були виділені та визначені у [18].

З одержаних множин TMP, PMP формуються вектори, які подаються на вхід штучної нейронної мережі (ШНМ). Результатом роботи ШНМ є оцінка складності та якості проекту на основі точних метрик етапу проектування архітектури та прогнозовані оцінки складності та якості майбутнього програмного забезпечення на основі прогнозованих метрик етапу проектування архітектури [18].

Вибір структури та архітектури нейронної мережі здійснюється відповідно до особливостей і складності задачі. Для розв'язку окремих типів задач вже існують оптимальні конфігурації. Для вибору архітектури для аналізу метрик етапу проектування архітектури ПЗ та прогнозу характеристик якості ПЗ було проведено аналіз відомих архітектур штучних нейронних мереж [18], в результаті якого було обрано багатошаровий персептрон як архітектуру для аналізу метрик етапу проектування архітектури ПЗ та прогнозування характеристик якості ПЗ [18]. Структура цієї ШНМ представлена на рис. 3.

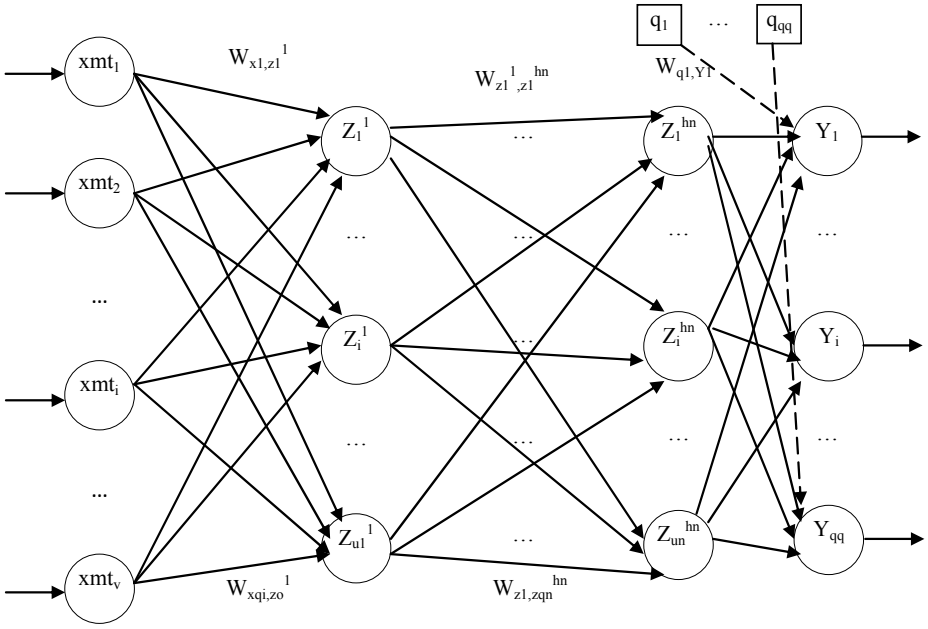


Рис. 3. Модель процесу оцінювання результатів проектування та прогнозування характеристик програмного забезпечення на основі штучної нейронної мережі

Нейрони (і відповідно входи) рецепторного шару визначено множиною $\overline{XMT} = \{xmt_i\},\ i = (\overline{1,v})$, де xmt_i – i-й нейрон (вхід) рецепторного шару, v – кількість входів (кількість метрик якості та складності ПЗ з точними та прогнозованими значеннями).

Нейрони першого прихованого шару прямонапрямленого персептрона визначено множиною $\overline{Z^1} = \{z_i^1\},\ i = (\overline{1,u1})$, де z_i^1 – i-й нейрон шару z^1, $u1$ – кількість нейронів першого прихованого шару. Рецепторні входи цього шару визначено множиною: $\overline{X^{z^1}} = \{x^{z_i^1}\},\ i = (\overline{1,u1})$, де $x^{z_i^1}$ – i-й вхід, пов'язаний з z_i^1-м нейроном.

Нейрони другого прихованого шару прямонапрямленого персептрона визначено множиною $\overline{Z^2} = \{z_i^2\},\ i = (\overline{1,u2})$, де z_i^2 – i-й нейрон шару z^2, $u2$ – кількість нейронів другого прихованого шару. Рецепторні входи цього шару визначено множиною: $\overline{X^{z^2}} = \{x^{z_i^2}\},\ i = (\overline{1,u2})$, де $x^{z_i^2}$ – i-й вхід, пов'язаний з z_i^2-м нейроном.

Нейрони hn-го прихованого шару прямонапрямленого персептрона визначено множиною $\overline{Z^{hn}} = \{z_i^{hn}\}, i = (\overline{1,un})$, де z_i^{hn} – i-й нейрон шару z^{hn}, un – кількість нейронів hn-го прихованого шару. Рецепторні входи цього шару визначено множиною $\overline{Z^{z^{hn}}} = \{z^{z_i^{hn-1}}\}, i = (\overline{1,unp})$, де $z^{z_i^{hn-1}}$ – i-й нейрон попереднього $(hn-1)$-го шару, що пов'язаний з z_i^{hn}-м нейроном, unp – кількість нейронів $(hn-1)$-го прихованого шару.

Вектор порогових величин зміщень множини нейронних елементів визначено як:

$\overline{q} = \{q_i\}$, $i = (\overline{1, qq})$, де q_i – зміщення i-го нейронного елемента, qq – кількість зміщень нейронних елементів.

Ваги зв'язків відображено ваговими матрицями: $\overline{W_{XMT,Z^1}} = \left\langle w_{x_i, z_j^1} \right\rangle$, $i = (\overline{1, v}), j = (\overline{1, u1})$, де w_{x_i, z_j^1} – ваговий коефіцієнт зв'язку між xmt_i-м входом та z_j^1-м нейроном першого прихованого шару; $\overline{W_{Z^1,Z^2}} = \left\langle w_{z_i^1, z_j^2} \right\rangle$, $i = (\overline{1, u1}), j = (\overline{1, u2})$, де $w_{z_i^1, z_j^2}$ – ваговий коефіцієнт зв'язку між z_i^1-м нейроном 1-го прихованого шару та z_j^2-м нейроном 2-го прихованого шару; $\overline{W_{Z^1,Z^{hn}}} = \left\langle w_{z_i^1, z_j^{hn}} \right\rangle$, $i = (\overline{1, u1}), j = (\overline{1, un})$, де $w_{z_i^1, z_j^{hn}}$ – ваговий коефіцієнт зв'язку між z_i^1-м нейроном 1-го прихованого шару та z_j^{hn}-м нейроном hn-го прихованого шару; $\overline{W_{Z^{hn-1},Z^{hn}}} = \left\langle w_{z_i^{hn-1}, z_j^{hn}} \right\rangle$, $i = (\overline{1, unp}), j = (\overline{1, un})$, де $w_{z_i^{hn-1}, z_j^{hn}}$ – ваговий коефіцієнт зв'язку між z_i^{hn-1}-м нейроном $(hn-1)$-го прихованого шару та z_j^{hn}-м нейроном hn-го прихованого шару; $\overline{W_{q,Y}} = \left\langle w_{q_i, Y_i} \right\rangle$, $i = (\overline{1, qq})$, де w_{q_i, Y_i} – ваговий коефіцієнт зв'язку між q_i-м зміщенням та Y_i-м нейроном вихідного шару.

Множина вихідних функціоналів ефекторного шару ШНМ становить $\overline{Y} = \{Y_{ki}\}$, $ki = (\overline{1, qq})$, де Y_{ki} – ki-й функціонал ефекторного шару багатошарового персептрону, qq – кількість виходів ШНМ (кількість прогнозованих характеристик ПЗ).

Формула для визначення ki-го функціоналу ефекторного шару ШНМ Y_{ki} має вигляд:

$$Y_{ki} = fs\left(fan(z^1) \cdot \left(\sum_{i=1}^{o} \sum_{j=1}^{qn2} (z_i^1 \cdot w_{z_i^1, z_j^2}) + ... + \sum_{i=1}^{o} \sum_{j=1}^{qn} (z_i^1 \cdot w_{z_i^1, z_j^{hn}}) \right) + \right.$$
$$\left. + ... + fan(z^{hn-1}) \cdot \left(\sum_{i=1}^{qnm} \sum_{j=1}^{qn} (z_i^{hn-1} \cdot w_{z_i^{hn-1}, z_j^{hn}}) \right) + \sum_{i=1}^{qki} (xmt_i \cdot w_{x_i, z_i}) \right) - q_{ki} \cdot w_{q_{ki}, Y_{ki}} \quad (9)$$

де $fan(z^1)$ – активаційна функція нейронів 1-го прихованого шару, $fan(z^{hn-1})$ – активаційна функція нейронів $(hn-1)$-го прихованого шару, fs – активаційна функція нейронів ефекторного (вихідного) шару ШНМ, qki – кількість метрик, які впливають на ki-й вихід ШНМ (на ki-у прогнозовану характеристику ПЗ), xmt_i – i-й вхід ШНМ, який впливає на ki-й вихід ШНМ.

Активаційною функцією нейронів прихованих (асоціативних) шарів є функція гіперболічного тангенсу. Активаційною функцією нейронів ефекторного шару є лінійна функція. Результати лінійної активаційної функції нейронів ефекторних шарів лежать в інтервалі $[0;1]$.

Вперше запропонована модель процесу оцінювання результатів проектування та прогнозування характеристик ПЗ на основі ШНМ відрізняється від існуючих тим, що дає можливість враховувати важливість кожної метрики якості та складності ПЗ, а також взаємний вплив метрик в межах кожної характеристики програмного забезпечення. Вихідні функціонали ШНМ, що відповідають значенням характеристик ПЗ (якість програмного проекту, складність програмного проекту, прогнозована якість ПЗ, прогнозована складність ПЗ), дають можливість оцінити сумарний вплив метрик якості та складності на характеристики ПЗ.

Висновки

Розроблено моделі якості ПЗ за стандартом ISO 25010 та моделі якості і складності ПЗ з використанням результатів метричного аналізу на основі онтологій та зважених онтологій, які, за рахунок ґрунтування на онтологіях для відображення знань щодо взаємовпливу та кореляції характеристик і підхарактеристик за атрибутами, метрик за показниками, дають змогу виконати моделювання процесу оцінювання достатності інформації щодо якості у специфікаціях вимог до ПЗ.

Вперше розроблено інформаційні моделі процесу оцінювання достатності інформації для визначення якості ПЗ на основі стандарту ISO 25010:2011 та для визначення якості і складності ПЗ з використанням результатів метричного аналізу, які відображають особливості процесу оцінювання достатності інформації щодо якості у специфікації вимог до ПЗ, а також причинно-наслідкові зв'язки між моделями якості ПЗ за стандартом ISO 25010 на основі онтологій, між моделями якості і складності ПЗ з використанням результатів метричного аналізу на основі онтологій. Вперше розроблено моделі процесу оцінювання достатності інформації для визначення якості ПЗ на основі стандарту ISO 25010:2011 та для визначення якості і складності ПЗ з використанням результатів метричного аналізу, які формалізують процес оцінювання достатності інформації щодо якості у специфікації вимог до ПЗ та забезпечують теоретичне підґрунтя для розроблення методів та засобів оцінювання достатності інформації щодо якості у

специфікаціях вимог до ПЗ.

Основним внесок усіх розроблених моделей є те, що моделі дають можливість оцінити наявність інформації щодо якості для конкретних проектів (є вона чи взагалі відсутня), виявити, якої інформації недостатньо, і виявити джерела, де шукати недостатню інформацію.

Розроблена модель процесу оцінювання результатів проектування та прогнозування характеристик ПЗ на основі ШНМ відрізняється від відомих тим, що дає можливість враховувати ваги та взаємовпливи метрик якості та складності ПЗ в межах кожної характеристики ПЗ, а також оцінити сумарний вплив метрик на характеристики ПЗ (якість і складність програмного проекту, прогнозовані якість і складність ПЗ).

Література

1. Hastie Shane. Standish Group 2015 Chaos Report – Q&A with Jennifer Lynch [Electronic resource] / Shane Hastie, Stéphane Wojewoda. – Electronic data. – Mode of access : http://www.infoq.com/articles/standish-chaos-2015 (viewed on November 14, 2017). – Title from the screen.

2. Latest study shows rise in project failures [Electronic resource] : [Web-site]. – Electronic data. – Mode of access : http://kinzz.com/resources/articles/91-project-failures-rise-study-shows. – (viewed on November 14, 2017). – Title from the screen.

3. Maedche A. Software for people: fundamentals, trends and best practices (Management for professionals) / A. Maedche, A. Botzenhardt, L. Neer. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. – 293 p.

4. Cost of a bug within a software lifecycle [Electronic resource] : [Web-site]. – Electronic data. – Mode of access : http://www.testically.org/2012/02/09/cost-of-a-bug-within-a-software-lifecycle/. – (viewed on November 14, 2017). – Title from the screen.

5. Макконнелл С. Совершенный код. Мастер-класс / С. Макконнелл. – М. : Издательство "Русская редакция", 2013. – 896 с.

6. Шамие К. Системная инженерия для «чайников» / К. Шамие. – New York : John Wiley & Sons, 2014. – 76 с.

7. Levenson N. G. Engineering a safer world: systems thinking applied to safety / N. G. Levenson. – MIT Press, 2012. – 560 p.

8. Systems and software engineering. Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE). System and software quality models: ISO/IEC 25010:2011. – [Introduced 01.03.2011]. – Geneva (Switzerland): ISO, 2011. – 34 p. – (International standard).

9. Systems and software engineering. Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE). Measurement of system and software product quality: ISO 25023:2016. – [Introduced 31.03.2016]. – Geneva (Switzerland): ISO, 2016. – 45 p. – (International standard).

10. Fenton N. Software metrics: a rigorous and practical approach / N. Fenton, J. Bieman. – CRC Press, 2014. – 617 p.

11. Shostak I. Ontology approach to realization of information technology for normative profile formimg at critical software certification / I. Shostak, I. Butenko // Збірник наукових праць Військового інституту КНУ ім. Т. Г. Шевченка. – 2012. – № 38. – С. 250–253.

12. Литвин В. Моделювання інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень з використанням онтологічного підходу / В. Литвин // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2011. – № 2. – С. 93–101.

13. Henderson-Sellers B. An ontology for ISO software engineering standards: 1) Creating the infrastructure / B. Henderson-Sellers, C. Gonzalez-Perez, T. McBride, G. Low // Computer Standards & Interfaces. – 2014. – Vol. 36. – Issue 3. – P. 563–576.

14. Ruy F. B. An ISO-based software process ontology pattern language and its application for harmonizing standards / F. B. Ruy, R. A. Falbo, M. P. Barcellos, G. Guizzardi, G. K. S. Quirino // ACM SIGAPP Applied Computing Review. – 2015. – Vol. 15. – Issue 2. – P. 27–40.

15. Hamri M. M. Building an ontology for the metamodel ISO/IEC24744 using MDA process / M. M. Hamri, S. M. Benslimane // International Journal on Modern Education and Computer Science. – 2015. – Vol. 8. – P. 48–60.

16. Jin D. Ontology-based software analysis and reengineering tool integration: The OASIS service-sharing methodology / D. Jin, J. R. Cordy // The 21-st IEEE International Conference on Software Maintenance, September 25–30, 2005 : Proceedings. – Budapest (Hungary), 2005. – P. 613–616.

17. Bajnaid N. O. An ontological approach to model software quality assurance knowledge domain / N. O. Bajnaid, R. Benlamri, A. Pakstas, Sh. Salekzamankhani // Lecture Notes on Software Engineering. – 2016. – Vol. 4. – No. 3. – P. 193–198.

18. Говорущенко Т. О. Методологія оцінювання достатності інформації для визначення якості програмного забезпечення : монографія / Т. О. Говорущенко. – Хмельницький : Хмельницький національний університет, 2017. – 310 с.

19. Hovorushchenko T. Methodology of evaluating the sufficiency of information for software quality assessment according to ISO 25010 / T. Hovorushchenko // Accepted for publication in Journal of Information and Organizational Sciences. – 2017.

20. Hovorushchenko T. Models and methods of evaluation of information sufficiency for determining the

software complexity and quality based on the metric analysis results / T. Hovorushchenko // Central European Researchers Journal. – 2016. – Vol. 2. – Issue 2. – P. 42–53.

References

1. Hastie Shane. Standish Group 2015 Chaos Report – Q&A with Jennifer Lynch [Electronic resource] / Shane Hastie, Stéphane Wojewoda. – Electronic data. – Mode of access: http://www.infoq.com/articles/standish-chaos-2015 (viewed on November 14, 2017). – Title from the screen.

2. Latest study shows rise in project failures [Electronic resource]: [Web-site]. – Electronic data. – Mode of access: http://kinzz.com/resources/articles/91-project-failures-rise-study-shows viewed on November 14, 2017). – Title from the screen.

3. Maedche A. Software for people: fundamentals, trends and best practices (Management for professionals) / A. Maedche, A. Botzenhardt, L. Neer. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. – 293 p.

4. Cost of a bug within a software lifecycle [Electronic resource]: [Web-site]. – Electronic data. – Mode of access: http://www.testically.org/2012/02/09/cost-of-a-bug-within-a-software-lifecycle/ (viewed on November 14, 2017). – Title from the screen.

5. McConnell S. Code complete / S. McConnell. – Microsoft Press, 2013. – 896 p.

6. Shamieh C. Systems Engineering for Dummies / C. Shamieh. – Wiley Publishing, 2011. – 74 p.

7. Levenson N. G. Engineering a safer world: systems thinking applied to safety / N. G. Levenson. – MIT Press, 2012. – 560 pp.

8. Systems and software engineering. Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE). System and software quality models: ISO/IEC 25010:2011. – [Introduced 01.03.2011]. – Geneva (Switzerland): ISO, 2011. – 34 p. – (International standard).

9. Systems and software engineering. Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE). Measurement of system and software product quality: ISO 25023:2016. – [Introduced 31.03.2016]. – Geneva (Switzerland): ISO, 2016. – 45 p. – (International standard).

10. Fenton N. Software metrics: a rigorous and practical approach / N. Fenton, J. Bieman. – CRC Press, 2014. – 617 p.

11. Shostak I. Ontology approach to realization of information technology for normative profile formimg at critical software certification / I. Shostak, I. Butenko // Herald of the Military Institute of Kiev National University named after Taras Shevchenko. – 2012. – No. 38. – Pp. 250–253.

12. Lytvyn V. Modeling of intelligent decision support systems using the ontological approach / V. Lytvyn // Radio electronics, computer science, management. – 2011. No. 2. – Pp. 93-101 (2011) [in Ukrainian]

13. Henderson-Sellers B. An ontology for ISO software engineering standards: 1) Creating the infrastructure / B. Henderson-Sellers, C. Gonzalez-Perez, T. McBride, G. Low // Computer Standards & Interfaces. – 2014. – Vol. 36. – Issue 3. – Pp. 563-576.

14. Ruy F. B. An ISO-based software process ontology pattern language and its application for harmonizing standards / F. B. Ruy, R. A. Falbo, M. P. Barcellos, G. Guizzardi, G. K. S. Quirino // ACM SIGAPP Applied Computing Review. – 2015. – Vol. 15. – Issue 2. – Pp. 27-40.

15. Hamri M. M. Building an ontology for the metamodel ISO/IEC24744 using MDA process / M. M. Hamri, S. M. Benslimane // International Journal on Modern Education and Computer Science. – 2015. – Vol. 8. – Pp. 48-60.

16. Jin D. Ontology-based software analysis and reengineering tool integration: The OASIS service-sharing methodology / D. Jin, J. R. Cordy // The 21-st IEEE International Conference on Software Maintenance, September 25-30, 2005 : Proceedings. – Budapest (Hungary), 2005. – Pp. 613-616.

17. Bajnaid N. O. An ontological approach to model software quality assurance knowledge domain / N. O. Bajnaid, R. Benlamri, A. Pakstas, Sh. Salekzamankhani // Lecture Notes on Software Engineering. – 2016. – Vol. 4. – No. 3. – Pp. 193-198.

18. Hovorushchenko T. Methodology of evaluating the sufficiency of information for software quality assessment: monograph / T. Hovorushchenko. – Khmelnitsky National University, 2017. – 310 p.

19. Hovorushchenko T. Methodology of evaluating the sufficiency of information for software quality assessment according to ISO 25010 / T. Hovorushchenko // Accepted for publication in Journal of Information and Organizational Sciences. – 2017.

20. Hovorushchenko T. Models and methods of evaluation of information sufficiency for determining the software complexity and quality based on the metric analysis results / T. Hovorushchenko // Central European Researchers Journal. – 2016. – Vol. 2. – Issue 2. – Pp. 42-53.

Рецензія/Peer review : 20.11.2017 р. Надрукована/Printed :06.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., професор кафедри КНІТ ХНУ, О.В.Бармак

УДК 621.391 160164

С.М. ЛИСЕНКО, Д.І. СТОПЧАК, В.В. САМОТЕС
Хмельницький національний університет

МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ КІБЕР-ЗАГРОЗ НА ОСНОВІ ЕВОЛЮЦІЙНИХ АЛГОРИТМІВ

В роботі представлено метод виявлення кібер-загроз на основі еволюційних алгоритмів. Метод дозволяє забезпечити реагування на нові загрози, забезпечуючи захист комп'ютерних систем від як відомих, так і невідомих кібер-загроз. Робота системи виявлення нових загроз здійснюється на основі обробки зібраних в мережі та в комп'ютерній системі множини ознак кібер-загроз, виділення з неї підмножини таких ознак і створення таких необхідних правил, які дозволять виявити кібер-загрози. Процес використовує генетичні алгоритми для мінімізації необхідних ознак виявлення кібер-загроз, що і дозволяє ефективно використовувати наявні ресурси для захисту від кібер-загроз.

Ключові слова: кібер-загрози шкідливе програмне забезпечення, генетичні алгоритми, мутація, популяція, пристосованість, еволюція.

S. LYSENKO, D. STOPCHAK, V. SAMOTES
Khmelnytskyi National University

TECHNIQUE FOR DETECTION OF CYBERTHREAT BASED ON EVOLUTIONAL ALGORITHMS

The purpose of this paper is to develop a method for the cyber-threats detection based on the evolutionary algorithms.

In this work a method for cyber threat detection based on genetic algorithms is presented. The method allows detectihg both known and previously unknown threats. The usage of the genetic algorithms allowed to use them as the basis for building a method of detecting cyber threats. The method has the heuristic nature and is based on the collected data about the cyber attacks. It makes it possible to give an answer about the presence of cyber threats in the computer network against the computer systems.

The mechanism of threat detection system is based on collection of threat features from network or a computer systems, extracting a subset of acquired set and generation of threat detection rules. Genetic algorithms are used for the minimization of the feature set, which allows effective using of the system resources for threat detection.

In this article a method for the dividing the feature space for threat detection rule generation is suggested. For division of the suggested method it is necessary to generate the threat detection sub-rule for each vale of the selected feature. It is suggested to use the feature with the smallest domain for generating the minimal set for rules. It is possible to select the optimal feature after all selected features which were discovered while applying the genetic algorithm. The sub-rule set is used with the aim to reduce false positive rate.

Developed threat detection system consists of training and detection subsystems. When some object detected as suspicious but cannot be unambiguously identified as a threat, and there is a partial feature match for a threat with no match for a benign object, this object is considered to be used for further improvement of the system on the training stage.

The process uses genetic algorithms to minimize the signs of detecting cyber threats, thereby reducing the resource intensity of the process of detecting cyber threats. The proposed method has demonstrated the ability to identify cyber threats with high confidence.

Keywords: genetic algorithms, cyber-threats, malware, cross-overer, mutation, population, adaptation, evolution.

Кількість активних користувачі у мережах постійно зростає, тому експоненціально зростають ризики здійснення кібер-загроз щодо них. Закон Меткалфа говорить, що корисність мережі залежить від кількості підключених користувачів, і пропорційна їх числу [1]. Зрозуміло, що зручність, корисність і необхідність, в свою чергу, збільшують кількість користувачів. Проте з точки зору кібер-безпеки, кожен додатковий користувач, додаток або функція, що працюють в мережі, збільшує можливість для атаки.

Одним з підходів до виявлення кібер-загроз є залучення механізмів машинного навчання, яке дозволяє не лише виявляти, але й запобігати атакам нульового дня. Такі підходи покладаються на евристичні механізми і нечіткі відповідності, що надає перевагу перед звичайними методами, зокрема перевірці сигнатур.

Системи виявлення вторгнень розглядаються як перша лінія захисту для комп'ютерних систем. Вони призначені для моніторингу та захисту комп'ютерних систем. Системи виявлення вторгнень динамічно контролюють і аналізують події, що відбуваються в системі, і визначають ступінь їх легітимності [2].

З огляду на стан речей, що склався на даний момент, актуальною є задача розроблення методу виявлення кібер-загроз, який мав би евристичну природу, яка б забезпечувалася застосуванням апарату еволюційних алгоритмів. Виявлення нових загроз має здійснюватися на основі використання зібраних даних, а результат щодо наявності кібер-загрози отримують шляхом роботи побудованих правил. Метод повинен забезпечити реагування на нові загрози, забезпечуючи захист комп'ютерних систем від як відомих, так і невідомих кібер-загроз.

Генетичні алгоритми як засіб виявлення кібер-загроз. Антивірусне програмне забезпечення, яке використовує технології, що базуються на сигнатурних аналізаторах, зазвичай не може виявити шкідливе програмне забезпечення (ШПЗ) нульового дня [3]. Вирішення цієї проблеми покладено на евристичні методи виявлення. Генетичні алгоритми відносять до евристичних алгоритмів. Вони дозволяють віднайти прийнятне рішення в більшості випадків, проте при цьому правильність рішення математично не доводиться і застосовується найчастіше для задач, аналітично вирішити яких дуже важко чи неможливо. Також генетичні алгоритми дозволяють формувати правила виявлення ШПЗ на основі попередніх виявів загроз.

Еволюційні обчислення за своєю суттю є оптимізаційним методом та системою автоматизації проектування для унікального механізму відбору, оскільки він отримав це від природи, зокрема біологічної

основи [4]. В генетичних алгоритмах закладені принципи, запозичені у природи. Ці принципи - спадковість і мутація. Спадковість – здатність організмів передавати свої ознаки і особливості розвитку потомству. Завдяки цій здатності всі живі істоти зберігають в своїх нащадках характерні риси виду. Мутація генів у живих організмів забезпечує генетичну різноманітність популяції і має випадковий характер, так як природа заздалегідь не знає, які саме ознаки особин будуть найкращими в майбутньому (зміна клімату, зменшення або збільшення кількості їжі, поява конкуруючих видів і т.п.). Саме мутація дозволяє з'явитися особинам з новими ознаками, які можуть виживати і залишити потомство в нових, змінених умовах [5].

Природний відбір, схрещування і мутація забезпечують розвиток популяції. Кожне нове покоління вважається більш пристосованим, ніж попереднє. Воно краще задовольняє вимогам зовнішнього середовища. Цей процес називається еволюцією.

Процес схрещування називається кросовером і є основним генетичним оператором, за рахунок якого здійснюється обмін генетичним матеріалом між особами.

Як відомо, принцип природного відбору полягає в тому, що в конкурентній боротьбі виживає найбільш пристосований. Зазвичай пристосованість особи визначається цільовою функцією, яку називають фітнес - функцією.

Генетичні алгоритми використовуються для аналізу величезних обсягів багатовимірних даних, які обробляються системою виявлення вторгнень [6]. Генетичні алгоритми еволюціонують з часом, що робить їх гарним вибором для динамічного формування правил, які в подальшому будуть здатними розв’язувати поставлену задачу.

Таким чином, використання можливостей генетичних алгоритмів дозволить використати їх як основу для побудови методу виявлення кібер-загроз. При цьому метод матиме евристичну природу і на основі зібраних даних щодо кібер-атак буде спроможним дати відповідь щодо наявності кібер-загрози.

Метод виявлення кібер-загроз на основі еволюційних алгоритмів. В статті пропонується метод виявлення кібер-загроз на основі еволюційних алгоритмів. Метод дозволяє забезпечити реагування на нові загрози, забезпечуючи захист комп’ютерних систем від як відомих, так і невідомих кібер-загроз. Робота системи виявлення нових загроз здійснюється на основі обробки зібраних в мережі та в комп’ютерній системі множини ознак кібер-загроз, а також на основі виділення з неї підмножини таких ознак і створення таких необхідних правил, які дозволять виявити кібер-загрози.

Процес використовує генетичні алгоритми для мінімізації необхідних ознак виявлення кібер-загроз, що і дозволяє ефективно використовувати наявні ресурси для захисту від кібер-загроз.

Метод складається з двох етапів: 1) етап навчання системи виявлення кібер-загроз; 2) етап виявлення кібер-загроз.

Укрупнена схема функціонування методу виявлення кібер-загроз на основі еволюційних алгоритмів подана на рис. 1.

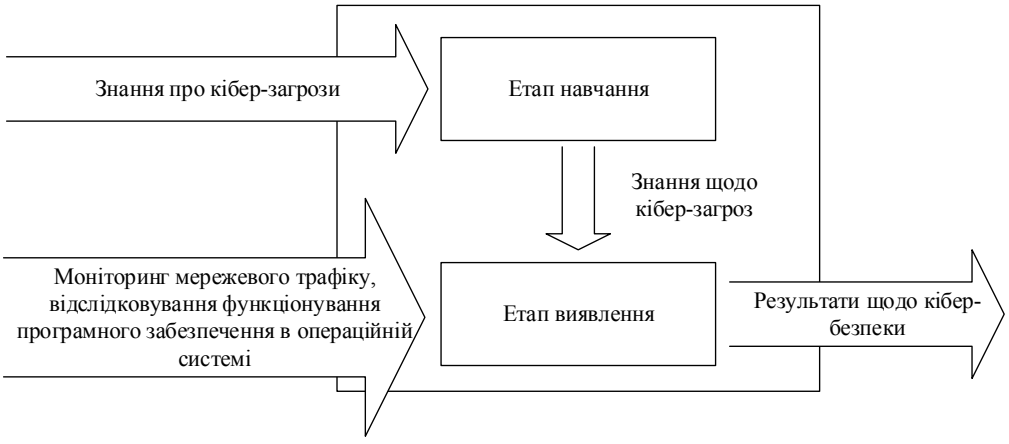


Рис. 1. Укрупнена схема функціонування методу виявлення кібер-загроз на основі еволюційних алгоритмів

Розглянемо кроки функціонування етапу навчання як складового метода виявлення кібер-загроз на основі еволюційних алгоритмів:

1) формування знань щодо кібер-загроз на основі відомих ознак та їх проявів;

2) формування вектору ознак щодо можливої кібер-загрози;

3) здійснення аналізу та поділ кібер-загроз класи;

4) застосування генетичного алгоритму для мінімізації кількості ознак, необхідних для виявлення кібер-загроз та віднесення їх до певного класу;

5) формування правил для виявлення кібер-загроз та віднесення їх до певного класу.

Розглянемо кроки функціонування етапу виявлення кібер-загроз на основі еволюційних алгоритмів:

1) збір інформації, що вказує на можливу присутність кібер-загроз (моніторинг мережевого трафіку, відслідковування функціонування програмного забезпечення в операційній системі);

2) здійснення виявлення кібер-загроз на основі застосування генетичного алгоритму з подальшим

віднесенням їх до певного класу;

3) на основі одержаного результату здійснення відповідного реагування на можливу кібер-загрозу.

Загальна схема функціонування метода виявлення кібер-загроз на основі еволюційних алгоритмів подана на рис. 2.

Розглянемо більш детально перший етап методу виявлення кібер-загроз на основі еволюційних алгоритмів.

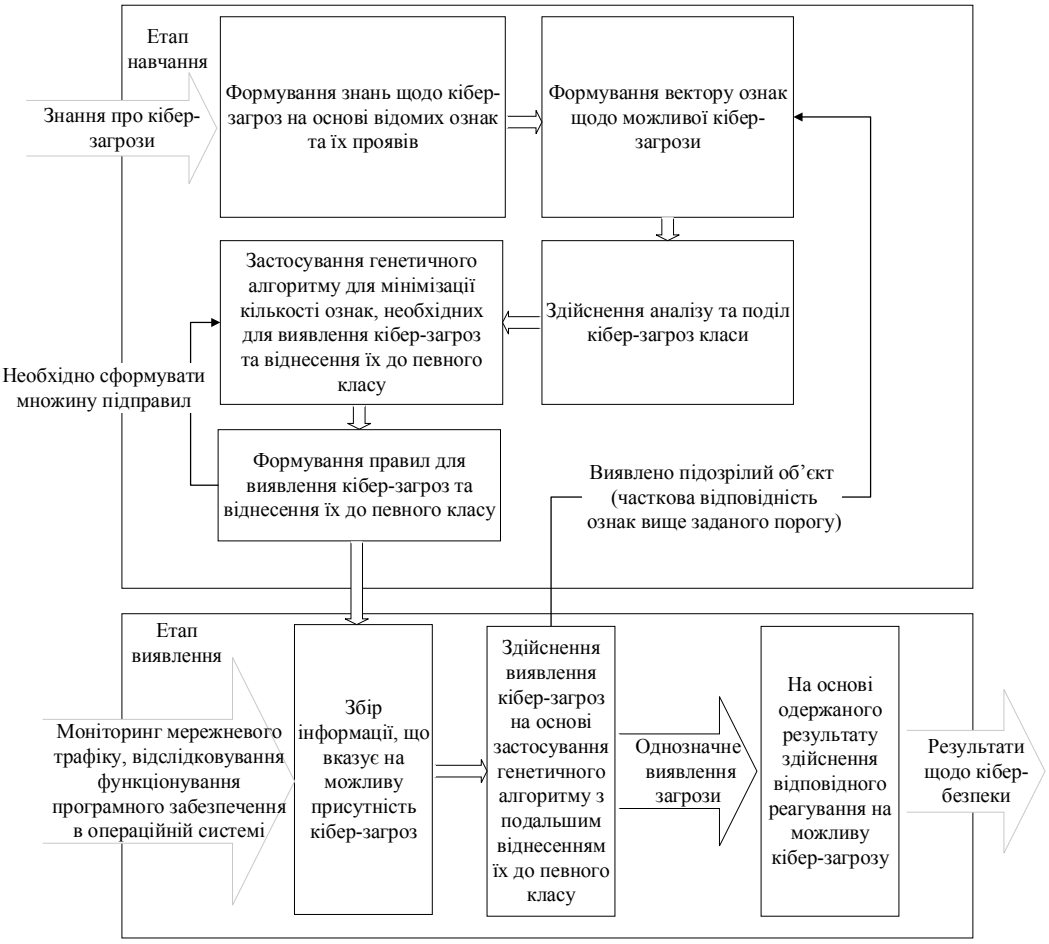


Рис. 2. Загальна схема функціонування методу виявлення кібер-загроз на основі еволюційних алгоритмів

Формування знань щодо кібер-загроз на основі відомих ознак та їх проявів. Для генерації правил виявлення кібер-загроз використано множину ознак (поведінка підключень, використання команд, з'єднань до служб тощо), що свідчать про їх присутність.

Формування вектору ознак щодо можливої кібер-загрози. Для побудови знань щодо кібер-загроз в роботі розглядається поняття «з'єднання» - послідовність TCP-пакетів, що починаються і закінчуються в визначений час, і між якими потоки даних надсилаються з IP-адреси зловмисника до цільової IP-адреси жертви в рамках визначеного протоколу. Кожне з'єднання позначене як звичайне, або як загроза з точно визначеним одним конкретним типом атаки. Кожен запис з'єднання складається приблизно з 100 байт [7].

Подамо множину з'єднань як $V = \{v_i\}_{i=1}^{N_v}$, де N_v – загальна кількість з'єднань. Нехай $Q = \{q_i\}_{i=1}^{N_q}$ – множина ознак з'єднань, де N_q – загальна кількість ознак, тоді $M = \left(m_{ij}\right)_{i=1,\,j=1}^{N_v,\,N_q}$ – матриця даних, кожен рядок якої є вектором ознак.

Вектор ознак з'єднань подамо наступним чином:

$$Q_{c_i} = \begin{pmatrix} L_{c_i}^N & P_{c_i}^T & S_{c_i}^T & F_{c_i} & SB_{c_i}^N & DB_{c_i}^N & L_{c_i} \\ WF_{c_i}^N & U_{c_i}^N & H_{c_i} & FL_{c_i}^N & LI_{c_i} & NC_{c_i}^N & RS_{c_i} \\ SA_{c_i}^N & R_{c_i}^N & FC_{c_i}^N & S_{c_i}^N & AF_{c_i}^N & OC_{c_i}^N & HL_{c_i} \\ QL_{c_i} & C_{c_i}^N & SC_{c_i}^N & SR_{c_i} & SSR_{c_i} & RR_{c_i} & SRR_{c_i} \\ SR_{c_i}^{srv} & DR_{c_i}^{srv} & SDHR_{c_i} & DHC_{c_i} & DHSC_{c_i} & DHSSR_{c_i} & DHDSR_{c_i} \\ DHSSPR_{c_i} & DHSDHR_{c_i} & DHSR_{c_i} & DHSR_{c_i}^{srv} & DHRR_c & DHRR_{c_i}^{srv} & \end{pmatrix},$$

де $L_{c_i}^N$ – довжина (кількість секунд) з'єднання; $P_{c_i}^T$ – тип протоколу (tcp, udp); $S_{c_i}^T$ – тип протоколу прикладного рівня (http, telnet); F_{c_i} – нормальний або помилковий статус з'єднання; $SB_{c_i}^N$ – кількість переданих байт даних від джерела до пункту призначення; $DB_{c_i}^N$ – кількість байт даних від пункту призначення до джерела; L_{c_i} – 1, якщо з'єднання з/до того ж хосту/порта, інакше 0; $WF_{c_i}^N$ – кількість неправильних фрагментів; $U_{c_i}^N$ – кількість термінових пакетів; H_{c_i} – кількість гарячих показників; $FL_{c_i}^N$ – кількість невдалих спроб входу; LI_{c_i} – 1, якщо успішно залогінились, інакше 0; $NC_{c_i}^N$ – кількість скомпрометованих значень; RS_{c_i} – 1, якщо отримано адміністративні права, інакше 0; $SA_{c_i}^N$ – 1, якщо команда su root спробувана, інакше 0; $R_{c_i}^N$ – кількість адміністративних доступів; $FC_{c_i}^N$ – кількість операцій створення файлів; $S_{c_i}^N$ – кількість рядків командної оболонки; $AF_{c_i}^N$ – кількість операцій на доступ до контрольних файлів; $OC_{c_i}^N$ – кількість вихідних команд під час ftp-сеансу; HL_{c_i} – 1, якщо логін належить до списку адміністраторів, інакше 0; QL_{c_i} – 1, якщо логін гостьовий, інакше 0; $C_{c_i}^N$ – кількість підключень до того ж хосту як поточне з'єднання в останні дві секунди; $SC_{c_i}^N$ – кількість підключень до того ж сервісу як поточне з'єднання в останні дві секунди; SR_{c_i} – % з'єднань, які мають помилку SYN; SSR_{c_i} – відсоток з'єднань, які мають помилку SYN; RR_{c_i} – відсоток з'єднань, які мають помилку REJ; SRR_{c_i} – відсоток з'єднань, які мають помилку REJ; $SR_{c_i}^{srv}$ – відсоток підключень до однієї служби; $DR_{c_i}^{srv}$ – відсоток з'єднань до різних служб; $SDHR_{c_i}$ – відсоток підключень до різних хостів; DHC_{c_i} – кількість хосту призначення; $DHSC_{c_i}$ – $SC_{c_i}^N$ для хосту призначення; $DHSSR_{c_i}$ – SSR_{c_i} для хосту призначення; $DHDSR_{c_i}$ – $DR_{c_i}^{srv}$ для хосту призначення; $DHSSPR_{c_i}$ – відсоток підключень до одного порта для хосту призначення; $DHSDHR_{c_i}$ % підключень до різних портів для хосту призначення; $DHSR_{c_i}$ – відсоток підключень до поточного хосту, які мають помилку S0; $DHSR_{c_i}^{srv}$ – відсоток підключень до поточного хосту та вказаної служби які мають помилку S0; $DHRR_c$ – відсоток підключень до поточного хосту, які мають помилку RST; $DHRR_{c_i}^{srv}$ – відсоток підключень до поточного хосту та вказаної служби які мають помилку RST.

Позначимо промарковану вибірку даних, побудовану на апріорних знаннях щодо приналежності аналізованих даних до типу загрози за сукупністю ознак, як $V_l = \{v_{li}\}_{i=1}^{N_{V_l}}$, де N_{V_l} – кількість з'єднань в промаркованій вибірці даних, а немарковану вибірку з'єднань як $V_u = \{v_{ui}\}_{i=1+N_{V_l}}^{N_v}$.

Нехай $H = \{h_i\}_{i=1}^{N_h}$ – множина наперед визначених типів з`єднань, де N_h=23 – кількість типів з'єднань, що складаються з 22 загроз: h_1=«ack», h_2=«buffer_overflow», h_3=«ftp_write», h_4=«guess_passwd», h_5=«imap», h_6=«ipsweep», h_7=«land», h_8 =«loadmodule», h_9=«multihop», h_{10}=«neptune», h_{11} =«nmap», h_{12}=«perl», h_{13}=«phf», h_{14}=«pod», h_{15}=«portsweep», h_{16} =«rootkit», h_{17}=«satan», h_{18}=«smurf», h_{19}=«spy», h_{20}=«teardrop», h_{21}=«warezclient», h_{22}=«warezmaster». Також в вибірці присутні звичайні з'єднання, що не становлять загрозу h_{23}=«normal», тоді $V_h = \{v_{h_i}\}_{i=1}^{N_{V_h}}$ – множина об'єктів промаркованої вибірки, що належать визначеному класу, де N_{V_h} – кількість об'єктів в класі. Задачу визначення типу загрози можна виразити функцією $\int_{detect}: V_{\min} \to H$.

Також важливо зазначити, що кожна ознака з'єднання характеризується визначеною множиною значень для різних типів кібер-загроз. Наприклад, при атаці pod ознака src_bytes, кількість байтів даних, надісланих джерелом IP-адреси, має значення 1480 і 564.

Здійснення аналізу та поділ кібер-загроз класи. На цьому етапі необхідним є однозначне визначення типу кібер-загрози для подальшого виокремлення підмножини ознак для формування правил виявлення атаки. Наприклад в наборі NSL-KDD присутні двадцять два класи атак в навчальних даних, чотири типи:

1) DOS – відмова в обслуговуванні;

2) R2L – неавторизований доступ із віддаленого комп'ютера;

3) U2R – несанкціонований доступ до локальних прав адміністратора, наприклад, різні атаки «буферного переповнення»;

4) Зондування – спостереження, наприклад, сканування порту.

Застосування генетичного алгоритму для мінімізації кількості ознак, необхідних для виявлення кібер-загроз та віднесення їх до певного класу. Генетичний алгоритм вибирає кращих представників попереднього покоління, схрещує їх і отримує безліч нових особин. Це нове покоління містить краще співвідношення характеристик, якими володіють хороші члени попереднього покоління. Таким чином, з покоління в покоління, характеристики з кращими досягнутими показниками поширюються по всій популяції. Схрещування найбільш пристосованих особин призводить до того, що досліджуються найбільш перспективні ділянки простору пошуку. В кінцевому результаті, популяція буде сходитися до оптимального розв'язання задачі.

Для виявлення загроз розглядатимемо не тільки дискретні значення, а значення, що набувають в інтервалі. В специфіці кібер-загроз це дозволить використовувати толерантність до неточностей, невизначеності, можливої часткової істини. Це дозволить виявляти загрози, знаходячи відхилення від нормальної поведінки і ознак в даних. Якщо відхилення перевищують заданий поріг, то дані вважаються аномальними.

В роботі пропонується використання генетичних алгоритмів для створення сукупності ознак, які дозволяють виявляти кібер-загрозу. Вказані ознаки представляються у вигляді закодованих двійковий послідовностей, де 1 в розряді такої послідовності вказує на необхідність цієї ознаки для детектування визначеної загрози.

Схема функціонування генетичного алгоритму показані в на рисунку 3. Кроки роботи алгоритму такі:

1. Генерація початкової популяції з n хромосом.
2. Обчислення пристосованості для кожної особи.
3. Вибір пари осіб-батьків за допомогою одного з методів відбору.
4. Проведення кросинговеру двох предків з ймовірністю p_c для створення нащадків.
5. Проведення мутації нащадків з ймовірністю p_m.
6. Повторення кроків 3-5, поки не буде згенеровано нове покоління популяції, що містить n хромосом.
7. Повторення кроків 2-6, поки не буде досягнутий критерій закінчення процесу.

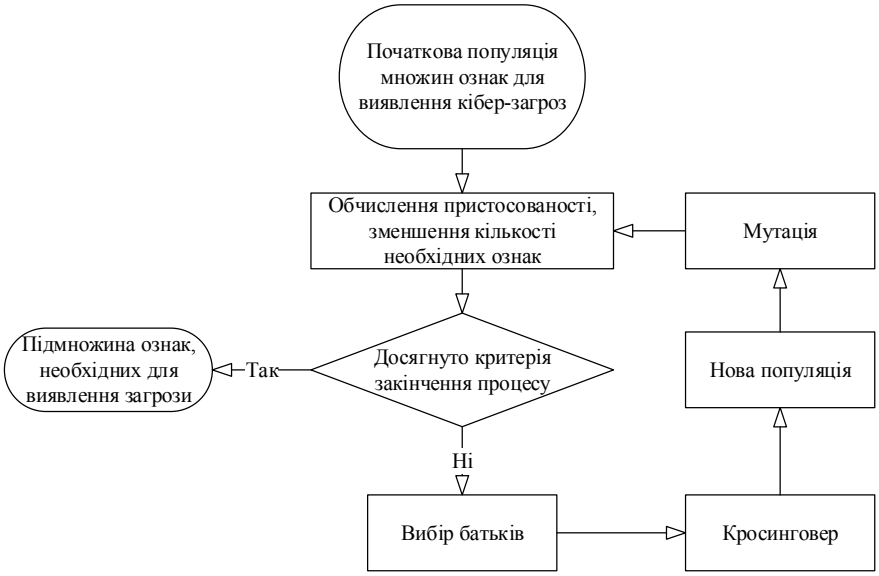


Рис. 3. Схема функціонування кроку застосування генетичного алгоритму для мінімізації кількості ознак, необхідних для виявлення кібер-загроз та віднесення їх до певного класу

Першим кроком є вибір популяції хромосом. В роботі пропонується початкову популяцію генерувати з вказанням необхідності всіх ознак для виявлення кібер-загроз. В ході роботи алгоритму залишаться тільки необхідні гени. Кожна хромосома складається з кінцевого числа генів, яка визначена в кожній реалізації. Ці хромосоми є даними, що представляють сукупність ознак, необхідних для виявлення кібер-загроз.

Другим кроком є кросинговер хромосом для появи наступного покоління. Відповідно до вимог потрібного рішення, різні позиції генів у хромосомі кодуються як цифри, біти або символи.

Третім кроком є використання мутації для вдосконалення популяції, де кожна хромосома

задовольняє заздалегідь визначену функцію фітнесу.

Четвертим кроком є перевірка досягнення поставленої мети.

Для методу виявлення кібер-загроз на основі еволюційних алгоритмів було використано 41 ознаку, які вказують на особливості функціонування з'єднань. Зокрема, було залучено мережні протоколи (TCP, UDP і т.д.), тривалість (кількість секунд) з'єднання, тип протоколу прикладного рівня (HTTP, Telnet), кількість переданих даних (байт даних від джерела до місця призначення) , кількість отриманих даних (кількість байт даних від одержувача до джерела), нормальний або помилковий статус з'єднання та ін.

Для виявлення загрози не всі ознаки можуть бути необхідні, до того ж, перевірка кожної ознаки знизить ефективність роботи методу. Тому за допомогою генетичних алгоритмів необхідно виявити підмножину з наявних, які є достатніми для однозначного виявлення.

З цією метою необхідно виконати наступні кроки:

1. Здійснити кодування: гени виражаються як двійковий код. Хромосома виражається як двійковий рядок

$A_i, a_1 \dots a_n$, де A_i=0,1 і вказує на те, чи є ознака присутня в підмножині ознак для генерації правил.

2. Використати функцію фітнесу (зрозуміло, що для виявлення загрози, необхідна присутність хоча б однієї ознаки):

$$f = \frac{n - \sum_{i=1}^{n} a_i}{n} = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} a_i ,$$

де n – кількість ознак.

З межами [0; 1), де наближення до 1 – покрашення результату, тобто зменшення кількості ознак, необхідних для виявлення загрози.

Формування правил для виявлення кібер-загроз та віднесення їх до певного класу. Цей крок передбачає формування необхідних підмножин ознак, достатніх для виявлення кібер-загроз. За допомогою методу виявлення кібер-загроз на основі еволюційних алгоритмів здійснюється побудова множини правил на їх основі, для виявлення однієї загрози можливе створення декількох правил з різними підмножинами ознак. Можливе використання ознак нормальних з'єднань для вдосконалення методу і виключення хибних реагувань.

Якщо правило не покриває необхідну кількість виявлених кібер-загроз (наприклад, не менше 99%), або присутня велика кількість помилок другого роду, на етапі формування правил для виявлення кібер-загроз та віднесення їх до певного класу, то метод вибирає ознаку, яка може приймати більш ніж одне значення. Після цього здійснюється повернення до попереднього кроку (застосування генетичного алгоритму для мінімізації кількості ознак, необхідних для виявлення кібер-загроз та віднесення їх до певного класу) з метою формування правила для кожного можливого значення вибраної ознаки. Вибір ознаки здійснюється послідовно. З метою генерації меншої кількості необхідних правил для виявлення загроз можливий вибір ознак з мінімальним можливим набором значень. Результатом роботи етапу «Формування правил для виявлення кібер-загроз та віднесення їх до певного класу» виступає правило або сукупність правил для виявлення кібер-загроз з кількістю, що дорівнює кількості унікальних значень ознаки, що була вибрана для поділу, або більше, в разі подальшого поділу.

Приймемо G як множину усіх правил. Нехай g_i – одне правило з множини. $g_i = (A_1) \wedge \dots \wedge (A_n)$, де n – кількість ознак, необхідних для виявлення кібер-загрози, A_n – ознака з сукупністю значень кібер-загрози, B_n – ознака з сукупністю значень для нормального з'єднання.

$A_k = \{a_{k_i}\}_{i=1}^{N_{A_k}}$, де k – кількість ознак кібер-загрози, a_{k_i} – значення, яке може приймати ознака кібер-загрози, $i = 1, N_{A_k}$ – кількість значень що може прийняти ознака кібер-загрози.

Правило g_i приймає вигляд:

$$if\,(A_1 \wedge \dots \wedge A_n) \Rightarrow "name_attack".$$

Розглянемо функціонування етапу виявлення кібер-загроз на основі еволюційних алгоритмів.

Збір інформації, що вказує на можливу присутність кібер-загроз. На даному етапі здійснюється моніторинг мережевого трафіку, відслідковування функціонування програмного забезпечення в операційній системі для виявлення кібер-загроз.

Здійснення виявлення кібер-загроз на основі застосування генетичного алгоритму з подальшим віднесенням їх до певного класу. Якщо правила однозначно виявили загрозу, крок 2 етапу виявлення загроз. Якщо виявлений підозрілий об'єкт (часткова відповідність ознак вище заданого порогу), крок 2 етапу навчання для класифікації та покращення механізму захисту.

На основі одержаного результату здійснення відповідного реагування на можливу кібер-загрозу. Отримання результатів щодо кібер-безпеки. Можливе блокування шкідливого чи небезпечного об'єкта кібер-загрози, повідомлення про небезпеку, активація захисних механізмів.

Експерименти. Для оцінки ефективності запропонованого методу було проведено ряд експериментів. З цією метою було використано набір даних NSL-KDD [8]. Ця база даних містить стандартний набір даних, що підлягає перевірці, який включає в себе широкий спектр вторгнень.

Таким чином, для проведення експериментів набір даних NSL-KDD було використано з метою виділення множини ознак кібер-загроз, виділення з неї підмножини таких ознак і створення таких необхідних правил, які дозволять виявити кібер-загрози.

Оцінка ефективності запропонованого методу була апробована на таких атаках: ack, buffer_overflow, ftp_write, guess_passwd, imap, ipsweep, land, loadmodule, multihop, neptune, nmap, normal, perl, phf, pod, portsweep, rootkit, satan, smurf, spy, teardrop, warezclient, warezmaster.

В роботі подано результати проведених експериментів на прикладі nmap кібер-загрози, яка збирає інформацію про цільову систему перед початком атаки.

Перший етап експерименту полягав у використанні даних NSL-KDD для етапу навчання і генерації правил виявлення кібер-загроз. З цією метою було обрано 301 атаку типу «nmap». Другий етап експерименту полягав в безпосередньому виявлені вказаної атаки на основі згенерованих методом набору правил. Серед поданих нешкідливих з'єднань, були присутні різні типи загроз, серед них 1493 атаки типу «nmap».

На рис. 4 представлені приклади ознак кібер-загроз, які присутні в навчальній вибірці, на основі яких згенеровано правила виявлення кібер-загроз. Кожна ознака може прийняти будь-яке значення, що вказане для неї по горизонталі таблиці даних. Аналогічно були згенеровані ознаки нормальної поведінки з'єднання. На основі таких поведінок можливою є генерація правил, придатних для виявлення кібер-загроз.

duration	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
protocol_type	icmp	tcp	udp	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
service	eco_i	gopher	sql_net	private	netbios_ns	ldap	ecr_i	uucp_path	http_443	mtp	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
flag	SF	SH	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
src_bytes	8	0	215	100	207	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
dst_bytes	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
land	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
wrong_fragment	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
urgent	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
hot	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
num_failed_logins	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
logged_in	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
num_compromised	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
root_shell	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
su_attempted	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
num_root	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
num_file_creations	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
num_shells	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
num_access_files	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
num_outbound_cmds	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
is_host_login	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
is_guest_login	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
count	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
srv_count	15	1	25	36	17	52	40	47	14	21	16	42	6	23	2	3	44	26	50	45
serror_rate	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
srv_serror_rate	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
rerror_rate	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
srv_rerror_rate	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
same_srv_rate	1	0,5	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
diff_srv_rate	0	1	0,04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
srv_diff_host_rate	1	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
dst_host_count	2	255	4	1	3	99	35	185	155	25	5	39	223	220	37	52	139	27	143	73
dst_host_srv_count	46	1	112	169	80	255	83	75	77	61	158	153	190	223	194	54	131	24	10	215
dst_host_same_srv_rate	1	0	0,84	0,03	0,83	0,85	0,08	0,6	0,19	0,01	0,15	0,12	0,87	0,89	0,09	0,02	0,86	0,5	0,16	0,9
dst_host_diff_srv_rate	0	1	0,02	0,74	0,01	0,72	0,6	0,96	0,95	0,05	0,04	0,93	0,86	0,92	0,03	0,73	0,85	0,91	0,75	0,89
dst_host_same_src_port_rate	1	0,84	0,77	0,83	0,85	0,68	0,6	0,79	0,96	0,19	0,94	0,89	0,15	0,12	0,87	0,64	0,88	0,93	0,97	0,8
dst_host_srv_diff_host_rate	0,26	0	0,25	0,3	0,27	0,28	0,33	0,31	0,4	0,29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
dst_host_serror_rate	0	1	0,77	0,68	0,79	0,96	0,94	0,89	0,64	0,88	0,93	0,97	0,8	0,91	0,95	0,71	0,2	0,56	0,75	0,86
dst_host_srv_serror_rate	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
dst_host_rerror_rate	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
dst_host_srv_rerror_rate	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Рис. 4. Ознаки загрози «nmap» з частиною значень, виявлених в ході кроку застосування генетичного алгоритму для мінімізації кількості ознак, необхідних для виявлення кібер-загроз та віднесення їх до певного класу

Для визначення ознак було встановлено наступні параметри генетичного алгоритму:

1. Мутація (p_m) – ймовірність 0.05.
2. Поколінь – 100.
3. Ймовірність кросинговеру – 1.
4. Особин в поколінні – 50.

Варто зауважити, що кожна особина в певному поколінні могла слугувати як множина ознак для розпізнавання загроз, якщо ні – відбирались найкращі нащадки попереднього покоління, відбувався процес кросинговеру і мутації. Суть застосування фітнес-функції полягала в зменшенні кількості необхідних ознак для виявлення загроз.

Експериментальні дослідження показали, що для виявлення атаки типу «nmap» необхідними є ознаки service, flag, src_bytes, dst_bytes, dst_host_srv_diff_host_rate.

Отже, для виявлення загрози типу «nmap», було згенероване та використане правило:

If (service ={eco_i | gopher | sql_net | private | netbios_ns | ldap | ecr_i | uucp_path | http_443 | mtp } ∧ flag={SF | SH} ∧ src_bytes={8 | 0 | 215 | 100 | 207} ∧ dst_bytes={0} ∧ dst_host_srv_diff_host_rate={0,26 | 0 | 0,25 | 0,3 | 0,27 | 0,28 | 0,33 | 0,31 | 0,4 | 0,29}) => «nmap».

В наборі даних, використовуваних для навчання, за допомогою згенерованого правила було виявлено 301 з 301 атак типу nmap, проте також хибно зреагувало на 1 випадок нормального з'єднання.

На етапі виявлення згенероване правило дозволило виявити 1454 з 1501 атак типу «nmap», що становить 96.868%. Експериментальні дослідження також продемонстрували факт хибних спрацювань на рівні 7 випадків, що становить 0.466%.

Також експериментальні дослідження проводилися по відношенню інших типів кібер-загроз, результати яких представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень для різних типів атак

Кібер-загроза	Рівень виявлення
nmap	96.868%
pod	100%
ipsweep	91.997%
smurf	92.252 %
teardrop	98.654%

Таким чином, запропонований метод продемонстрував можливість виявлення кібер-загрози з високою достовірністю.

Висновки. Запропоновано метод виявлення кібер-загроз на основі еволюційних алгоритмів. Метод дозволяє забезпечити реагування на нові кібер-загрози, забезпечуючи захист комп'ютерних систем від як відомих так і невідомих кібер-загроз. Робота системи виявлення нових загроз здійснюється на основі обробки зібраних в мережі та в комп'ютерній системі множини ознак кібер-загроз, виділення з неї підмножини таких ознак і створення таких необхідних правил, які дозволять виявити кібер-загрози.

Процес використовує генетичні алгоритми для мінімізації необхідних ознак виявлення кібер-загроз, що дозволяє знизити ресурсоємність процесу виявлення кібер-загроз.

References

1. Shapiro C. Information Rules: A Strategic Guide to the Network Economy / Carl Shapiro, Hal R. Varian, 1998, 352 p.

2. Pels M. Host-Based Intrusion Detection Systems Faculty of Science, Informatics Institute, University of Amsterdam / D. B. P., M. Pels [Technical Report], 2005.

3. Hassan M. Hybrid Intelligent System / Mohamed Hassan, 2013.

4. Dhammi A. Behavior Analysis of Malware Using Machine Learning / Arshi Dhammi.

5. Pancenko T.V. Genetic algorithms / T.V. Pancenko, 2007, 87 p.

6. Gowher M.P. Genetic algorithms in intrusion detection systems: A survey / M.P. Gowher, S. Kumar, 2014.

7. Intrusion detector learning. URL: http://kdd.ics.uci.edu/databases/kddcup99/ task.html.

8. NSL-KDD dataset. URL: http://www.unb.ca/cic/datasets/nsl.html.

Рецензія/Peer review : 06.11.2017 р. Надрукована/Printed :06.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Боровик О.В.

УДК 621.317.73

І.С. ПЯТІН, В.В. СЕРГЄЄВ
Хмельницький національний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ З ЗАВАДОСТІЙКИМ КОДУВАННЯМ

В роботі розглядається один з способів побудови цифрової системи зв'язку з завадостійким кодуванням. Розглядаються найбільш ефективні методи завадостійкого кодування сигналів для забезпечення оптимальної якості передачі інформації по каналу зв'язку. Також розглядаються найбільш ефективні методи декодування прийнятого сигналу на приймальній стороні.

Ключові слова: завадостійке кодування, згорткові коди, декодування Вітербі.

I.S. PYATIN, V.V. SERGEEV
Khmelnytskyi National Universtity

SIMULATION OF DIGITAL COMMUNICATIONS SYSTEM WITH ANTINOISE CODING

The purpose of the work is to simulate and research methods for constructing a digital communications system with antinoise encoding. The article deals with the most effective methods of antinoise signal encoding in order to provide the optimal quality of transmission of information over the communication channel. Convolutional codes are codes that correct errors and use continuous or sequential processing of information with short fragments (blocks). The convolutional encoder has a memory - the characters at its output depend not only on the information symbols, but also on the previous characters on its input. The state of the encoder is determined by the content of its memory. The classic error correction method is the Viterbi decoder, which is used to decode convolutional codes. This algorithm is optimal and easy to implement for short convolutional codes. Convolutional codes are used in most standards of data transmission systems, for example, in wireless networks, long-range space communications, satellite communications, and the like. As a result, the use of convolutional coding to increase the noise immunity of the link system is one of the best options. Due to its efficiency today, the convolutional codes are used by many digital communication systems. The communication system includes a message source, in this case the Bernoulli binary generator, convolutional code encoder, modulator, demodulator, decoder, message receiver. As a result of the research, it can be concluded that the use of verification codes to ensure a high level of noise immunity of the system is one of the best options, since they are one of the most efficient codes and inferior to the efficiency of only turbo codes. Another equally important advantage of convolutional coding is the relative simplicity of their decoding due to the Viterbi decoding algorithm.

Keywords: antinoise coding, convolutional codes, Viterbi decoding.

Вступ. Під час розповсюдження сигналів лініями передачі можуть виникати спотворення. Спотворення виникають в результаті впливу на інформаційний сигнал різних завад. Це призводить до помилкового прийому та відтворення інформації на приймальній стороні [1–3]. В якості завад можуть виступати погодні умови, теплові шуми, сигнали від інших джерел інформації тобто значна завантаженість середовища, тощо. З метою підвищення якості передачі інформації на значні відстані та в середовищах з великою кількістю завад використовують завадостійке кодування.

Згорткові коди використовуються для надійної передачі даних: відео, мобільного зв'язку, супутникового зв'язку. Вони використовуються разом з кодом Ріда-Соломона і іншими кодами подібного типу. До винаходу турбо-кодів такі конструкції були найбільш дієвими і відповідали межі Шеннона. Також згорткове кодування використовується в протоколі 802.11a на фізичному MAC-рівні для досягнення рівномірного розподілу «0» і «1» після проходження сигналу через скремблер, внаслідок чого кількість переданих символів збільшується в два рази і, отже, ми можемо домогтися сприятливого прийому на приймаючому пристрої.

Аналіз останніх досліджень, в яких започатковано розв'язання даної проблеми. Завадостійкі коди призначені для виявлення та виправлення помилок, що можуть виникати при передачі інформації по каналу зв'язку [1,2]. Завадозахищенність інформації досягається шляхом додавання до інформаційного повідомлення надлишковості, додаткових біт. Відповідно до способу додавання надлишкових біт завадостійкі коди можна поділити на блокові та згорткові. У випадку блокових кодів кожен блок інформаційних символів обробляється незалежно від інших. Згорткові коди, це коди, що використовують неперервну чи послідовну обробку інформації короткими фрагментами або блоками. Згортковий кодер представляє собою послідовну машину або автомат з кінцевою кількістю станів. Стан кодеру визначається вмістом його пам'яті. Кодер згорткового коду має властивості генерації вихідних даних за допомогою лінійного складання або згортки зміщених в часі імпульсів послідовності з імпульсною характеристикою кодеру. Він належить до класу пристроїв відомих як кінцеві автомати. Це загальна назва пристроїв, що мають пам'ять про минулі сигнали. В загальному випадку стан це мінімальна кількість інформації, на основі якої разом з поточними вхідними даними можна отримати вихідні дані кодера [1].

Згорткові коди. Згортковий код формується множиною всіх двійкових послідовностей, які створюються згортковим кодером. Теоретично ці послідовності нескінченні, однак стан кодеру періодично встановлюється в деякий завчасно відомий стан. Таким чином створюваний код приймає вигляд блокового коду. Структурна схема цифрової система зв'язку з використанням згорткового кодування приведена на рис. 1.

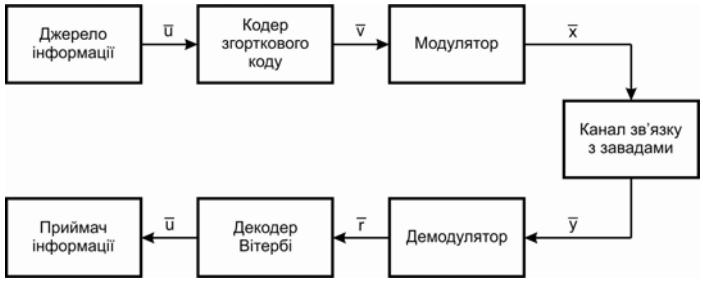


Рис. 1. Цифрова система зв'язку з використанням згорткового кодування

Кодер згорткового коду реалізовується на *kK*-розрядному регістрі зсуву та *n* суматорах за модулем 2 (рис. 2), де *K* – довжина кодового обмеження, це кількість *k*-бітових зсувів, після яких один інформаційний біт може вплинути на вихідний сигнал кодеру. В кожен момент часу на позицію перших *k* розрядів регістра переміщуються *k* нових біт, всі біти в регістрі зміщуються на *k* розрядів вправо і вихідні дані *n* суматорів послідовно дискретизуються утворюючи біти коду. Після чого дані символи коду використовуються модулятором для формування сигналів, що будуть передаватись по каналу зв'язку. Оскільки для кожної групи вхідних *k* біт повідомлення отримується *n* біт коду, то степінь кодування дорівнює *k/n* біт повідомлення на біт коду, причому $k < n$.

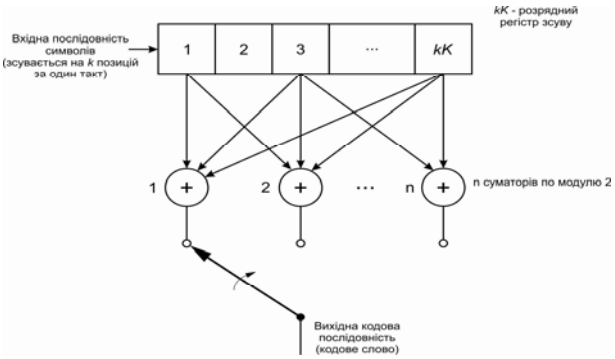


Рис. 2. Структурна схема кодеру згорткового коду з довжиною кодового обмеження *K* та ступенем кодування *k/n*

Описати кодер згорткового коду можна використовуючи його імпульсну характеристику тобто реакцію кодеру на одиничний біт. Для вхідної послідовності $m = 1\ 0\ 1$ вихідні дані можна знайти шляхом суперпозиції або лінійного додавання зміщених в часі вхідних імпульсів.

Одним з способів представлення кодуючих пристроїв є діаграма станів. Діаграма станів кодеру за рис. 2 показана на рис. 3. Стани зображені на діаграмі станів представляють собою можливий вміст *K*-1 крайніх правих розрядів регістру, а шляхи між станами – кодові слова на виході, які є результатом переходів між такими станами.

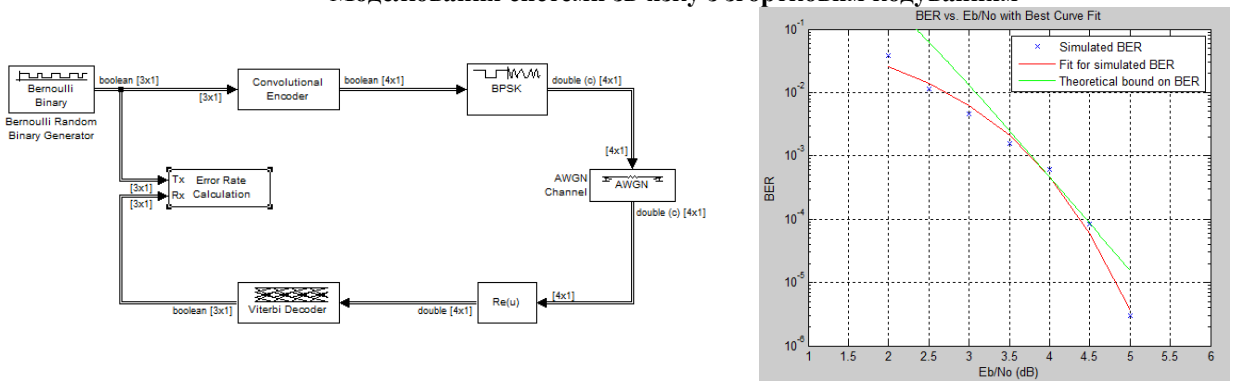
Рис. 3. Діаграма станів кодеру згорткового коду (ступінь кодування 1/2, *K* = 3)

Решітка згорткового коду має регулярну структуру. Повторюваність секцій решітки ефективно використовується при декодуванні. Ефективним рішенням проблеми декодування є алгоритм динамічного програмування, також відомий як алгоритм Вітербі. В системі зв'язку, що зображена на рис. 1 використовується декодер, що працює саме за даним алгоритмом. У найбільш поширеному варіанті декодер Вітербі знаходить кодову послідовність, що є найближчою до прийнятої, обробляючи її біт за бітом.

Перевагою декодування Вітербі над іншими методами декодування полягає в тому, що складність декодера не є функцією кількості символів в послідовності кодових слів. За алгоритмом розраховується міра подібності між сигналом отриманим в момент часу $t_{l,}$ і всіма шляхами решітки, що входять в кожен стан в момент часу t_i. В алгоритмі не розглядаються ті шляхи решітки, які, відповідно до принципу максимальної правдоподібності, завідома не можуть бути оптимальними. Якщо до одного стану входить два шляхи, то вибирається той, що має кращу метрику, такий шлях називають виживаючим. Визначення виживаючих шляхів відбувається для кожного стану. Таким чином, декодер поглиблюється в решітку, приймаючи рішення, шляхом виключення менш імовірних шляхів. Це дозволяє спростити процес декодування.

Основною властивістю алгоритму Вітербі є наступне: "В момент часу *i* найближчі до прийнятої послідовності шляхи $y^{(k)}$, що закінчуються в станах $S^{(k)}_i$, мають спільний початок в деякий момент *i-l"*. Зазвичай декодер Вітербі працює у вікні розміром *L* прийнятих з каналу *n*-ребер. Цю величину називають глибиною декодуваня.

Моделювання системи зв’язку з згортковим кодуванням



а) **б)**

Рис. 4. Simulink модель системи цифрового зв’язку з згортковим кодуванням (а); Залежність бітової помилки від відношення сигнал-шум (б)

До складу системи зв’язку (рис. 4) входять джерело повідомлення, в даному випадку це генератор Бернуллі, кодер згорткового коду, модулятор, демодулятор, декодер, приймач повідомлення.

Error Rate calculation, або калькулятор помилок, дозволяє обчислити коефіцієнт похибки отриманих даних і порівняти його з затримкою переданих даних. Вихідний вектор складається з частоти помилок, кількості виявлених помилок і загального числа символів. Цей вектор може бути направлений або в робочу область або в порт виводу. Затримки вказані в кількості зразків, незалежно від того, чи є вхідний сигнал скаляром або вектором. Входи в порти 'Tx' і 'Rx' повинні бути за типом даних скаляром або вектор-стовпцем. Параметр Stop simulation зупиняє моделювання при виявленні цільового показника числа помилок або максимальної кількість символів, в залежності від того, що станеться раніше. Коефіцієнт бітових помилок — відношення кількості помилкових бітів до їх загального переданого числа. Коефіцієнт бітових помилок, за інших рівних умов, залежить від кількості переданих бітів. Для забезпечення коректності порівняння різних цифрових систем зв'язку використовуються типові випробувальні послідовності, причому кожній стандартній швидкості передачі відповідає своя випробувальна послідовність. Такі псевдовипадкові послідовності (Pseudo-Random Bit Sequence, PRBS) за властивостями наближені до гаусового шуму, але мають певний період повторення.

Оцінка коефіцієнту бітових помилок наближається до 100% точності лише за нескінченно великого числа переданих бітів. Рівень достовірності оцінки, або довірчої ймовірності залежить й від кількості зареєстрованих помилок, й від загального числа переданих бітів.

Висновки. В роботі було розглянуто один з способів побудови цифрової системи зв’язку з завадостійким кодуванням. В результаті проведення досліджень можна зробити висновок, що використання загорткових кодів для забезпечення високого рівня завадостійкості системи є одним з найоптимальніших варіантів, оскільки вони є одними з найефективніших кодів та поступаються ефективністю лише турбо-кодам. Також не менш важливою перевагою згорткового кодування є відносна простота їх декодування завдяки алгоритму декодування Вітербі.

Література

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр ; пер. с англ. – Изд. 2-е, испр. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.

2. Прокис Д. Цифровая связь / Д. Прокис ; пер. с англ. ; под ред. Д.Д. Кловского. – М. : Радио и связь, 2000. – 800 с.

3. Пятін І. С. Дослідження послідовного каскадного турбокодування / І. С. Пятін, Д.А. Макаришкін // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 3. – С. 142–145.

References

1. Skliar B. Tsifrovaia sviaz. Teoreticheskie osnovi i prakticheskoe primenenie / B. Skliar. Izd. 2-e, ispr.: Per. s angl. – M. : Izdatelskiy dom «Viliams», 2003. – 1104 s.

2. Procis D. Tsifrovaia sviaz / D. Procis. Per. s angl./ Pod red. D.D. Klovskogo. – M. : Radio i sviaz, 2000. – 800 s.

3. Pyatin I.S. Doslidgennia poslidovnogo cascadnogo turbocoduvannia / I.S. Pyatin, D.A. Macaryshkin // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2017. – № 3. – C. 142–145.

Рецензія/Peer review : 09.11.2017 р. Надрукована/Printed :02.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Полікаровських О.І.

УДК 004.891

О.О. ПЕТРОВА, Р.В. БУРМЕНСЬКИЙ
Харківський національний університет будівництва та архітектури

ЛОГІЧНЕ ПРОГРАМУВАННЯ В РОЗРОБЦІ ІНФОРМАЦІЙНО-ДОВІДКОВОЇ СИСТЕМИ

Розроблена мовою логічного програмування Visual Prolog інформаційно-довідкова система астрономічного спрямування, яка надає рекомендації зі спостереження за сузір'ями згідно з широтою, на якій знаходиться спостерігач, при цьому існує можливість виведення списку найбільших зірок сузір'я та вибору міста, з якого відбувається спостереження. Інформаційно-довідкова система складається з трьох експертних систем: перша призначена для виведення списку зірок за фактором віддаленості від Сонця; друга – для виведення списку планет за фактом наявності або відсутності введених користувачем газів у складі їх атмосфери та третя – для надання рекомендацій зі спостереження за сузір'ями на основі широти, на якій знаходиться спостерігач. В цілому, запропонована інформаційно-довідкова система призначена для надання користувачу довідкової інформації стосовно небесних тіл Сонячної системи та віддалених астрономічних об'єктів, що полегшує пошук інформації стосовно оптимального часу спостереження за сузір'ями та надає перелік найбільших зірок у них астрономам-аматорам.

Ключові слова: логічне програмування, експертна система, астрономія, спектральний клас, Visual Prolog.

O.O. PETROVA, R.V. BURMENSKY
Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture

USE OF LOGICAL PROGRAMMING IN THE DEVELOPMENT OF THE INFORMATION REFERRAL SYSTEM

The article describes information referral system of astronomical direction developed in the logical programming language, Visual Prolog, which consist of three expert systems for determining both physical characteristics and chemical composition of astronomical objects, and for determining the best observing point on the globe, marked by geographical latitude and longitude. The first expert system intended for displaying a list of stars located in the user-defined range of distance from the Sun, and provides information about stellar type. The program consists of Constant section that describes amount of light years in a parsec and is intended for the conversion of corresponding measurement units. The Domains section describes the types of predicate arguments developed by the programmer, such as the name of the star, the star type, the distance to the Sun in light years and parsecs. The Predicates section of the program contains declaration of the following predicates: a predicate for the creation of facts containing the distance from the Sun to the star in light years and indefinite predicate (nondeterm), based on which a rule is created to search for stars within a given distance range, and an indefinite predicate that is intended to implement the rules of the user's menu. The Clauses section describes the facts and rules for working with the developed expert system. The second expert system is designed to display the list of planets in the presence or absence of user-introduced gases in their atmosphere. The Domains section describes the following predicate arguments: planet name, planet type, presence of atmosphere and name of the gas. The predicates section of the program consists predicates for creating planets database, defining presence or absence of planet's atmosphere, predicates for creating the rules for creating a list of dwarf, terrestrial or gas giant planets, and predicates for listing the planets in the presence or absence of the gas introduced by predicate argument. The third expert system provides advice on observing constellations based on the latitude or the city in which the observer is. The second and third expert systems have a structure similar to the first one. In general, the proposed information reference system is designed to provide the user with background information on the celestial bodies of the solar system and remote astronomical objects, which facilitates the search for information on the optimal time of observation of the constellations and provides a list of their largest stars to amateur astronomers.

Keywords: logical programming, expert system, astronomy, spectral class, Visual Prolog.

Вступ

Дослідження фізичних та хімічних властивостей небесних тіл є основною задачею сучасної астрономії. Такі фізичні характеристики планет та транснептунових об'єктів (ТНО), як середня температура поверхні, тиск, хімічний склад атмосфери, радіус, маса та рівень радіації, є дуже важливими чинниками під час проектування, вибору матеріалів та побудови космічних апаратів для дослідницьких місій.

Фізичні та хімічні характеристики планет, екзопланет, зірок та інших астрономічних об'єктів зазвичай визначаються за допомогою спектрального аналізу [1].

Постановка проблеми

Відсутність довідкової системи, що буде надавати рекомендації зі спостереження за небесними тілами для астрономів-любителів, збільшує час на пошук необхідної для спостереження інформації у різних джерелах. Через нахил вісі Землі по відношенню до екліптики, список сузір'їв, що можна спостерігати із заданої широти планети, варіюється впродовж року, тому в ході надання рекомендацій зі спостереження слід враховувати кращий для спостерігача місяць та час.

Важливою інформацією для астрономів також є фізичні та хімічні характеристики астрономічних об'єктів, оскільки існує певна кореляція між обладнанням та місцевістю для спостереження і властивостями небесного тіла. Наприклад, галактика Трикутника має невисоку яскравість і спостереження за нею найкраще проводити у сільській місцевості.

Дану проблему можна вирішити шляхом створення експертних систем (ЕС) для визначення основних властивостей астрономічних об'єктів за складом атмосфери планет і ТНО, за визначенням найближчих до Сонця зірок та за визначенням найкращого місця спостереження за небесними світилами.

Авторами була створена експертна система, що надає рекомендації зі спостереження за сузір'ями згідно з широтою, на якій знаходиться спостерігач, при цьому існує можливість виведення списку

найбільших зірок сузір'я та вибору міста, з якого відбувається спостереження.

Аналіз останніх досягнень та публікацій

Експертна система GEOBASE [2] на мові Visual Prolog є географічним довідником США, що містить інформацію про населення, столицю штату, штати, що межують з поточним, ріки, міста, найвищу та найнижчу географічну точку. Дана програма має синтаксичний аналізатор, що виконує аналіз запиту користувача на предмет ключових слів за допомогою зіставлення з шаблоном.

Програма Spacelab [3] призначена для проведення серій експериментів для астронавтів із тестування вестибулярного апарату.

В статтях [4, 5] мова логічного програмування була використана авторами для розробки експертних систем технічного та економічного спрямування.

Система, що була розроблена авторами, надає рекомендації зі спостереження за сузір'ями і має базу даних зірок та їх фізичних властивостей, а користування програмою виконується за допомогою меню користувача.

Проектування та реалізація експертних систем

Розроблена мовою логічного програмування Prolog інформаційно-довідкова система складається з трьох експертних систем. Перша експертна система дозволяє виводити перелік зірок, що знаходяться у заданому користувачем діапазоні на відстані від Сонця, а також надає інформацію про тип зірки. У розділі Constants описана константа lightYearsInParsek, що описує кількість світлових років у парсеках і слугує для відповідної конвертації величин.

У розділі програми Domains задекларовані starName (назва зірки) та starType (тип зірки) типу string; distance (відстань до Сонця у світлових роках), distancePK (відстань до Сонця у парсеках), range (діапазон відстані) типу real та item (пункт меню) цілочислового типу integer. Застосування даних доменів та їх зміст наданий у нижче описаних предикатах.

Розділ Predicates містить наступні предикати:

- defineStar (опис зірки) – предикат, що застосований для організації бази даних зірок та містить параметри starName та starType;
- starDist (відстань до зірки) – предикат, що використовується для створення фактів, що містять відстань від Сонця до зірки у світлових роках; аргументи даного предикату мають тип starName та distance;
- starsInRange – невизначений предикат (nondeterm), на основі якого створене правило зі знаходження зірок, що знаходяться у діапазоні відстані, вказаному параметром range; аргументи даного предикату мають тип distance та starName;
- starsInRangeType – невизначений предикат, який слугує для створення правила пошуку зірок, що знаходяться у межах вказаного діапазону відстані та мають визначений тип; має чотири параметри: range, distance, starName, starType;
- method – невизначений предикат, що призначений для реалізації правил роботи меню користувача; параметр item відповідає необхідному пункту меню; параметри starName та distance є вихідними і використані для виведення інформації про зірки, що відповідають умовам пошуку, які були задані користувачем;
- lightYearsToParsek – предикат, що описує правило конвертування відстані у світлових роках до парсеків і має параметри distance та distancePK.

На рис. 1 надано список доменів та предикатів розробленої експертної системи.

```
CONSTANTS
    lightYearsInParsek = 3.26156
DOMAINS
    starName, starType = string
    distance, distancePK, range = real
    item = integer
FACTS
    defineStar(starName,starType)
    starDist(starName,distance)

PREDICATES
    nondeterm starsInRange(range, distance, starName)
    nondeterm starsInRangeType(range, distance, starName, starType)
    nondeterm method(item, starName, distance)
    lightYearsToParsek(distance, distancePK)
```

Рис. 1. Список доменів та предикатів розробленої експертної системи

На рис. 2 зображено запит до експертної системи на виведення усіх червоних карликів на відстані, що не перевищує 10 світлових років.

```
Введите максимальное допустимое расстояние (св. лет): 10
Введите класс звезды: Красный карлик
Название звезды: Proxima Centauri, расстояние (св. лет): 4.2421 (1.300635279 пк)
Method=2, StarName=Proxima Centauri, Distance=4.2421, DistancePK=1.300635279
Название звезды: Barnard's Star, расстояние (св. лет): 5.963 (1.828266228 пк)
Method=2, StarName=Barnard's Star, Distance=5.963, DistancePK=1.828266228
Название звезды: Wolf 359, расстояние (св. лет): 7.7825 (2.38612811 пк)
Method=2, StarName=Wolf 359, Distance=7.7825, DistancePK=2.38612811
Название звезды: Lalande 21185, расстояние (св. лет): 8.2905 (2.541881799 пк)
Method=2, StarName=Lalande 21185, Distance=8.2905, DistancePK=2.541881799
Название звезды: Luyten 726-8 A, расстояние (св. лет): 8.728 (2.676020064 пк)
Method=2, StarName=Luyten 726-8 A, Distance=8.728, DistancePK=2.676020064
Название звезды: Luyten 726-8 B, расстояние (св. лет): 8.728 (2.676020064 пк)
Method=2, StarName=Luyten 726-8 B, Distance=8.728, DistancePK=2.676020064
Название звезды: Ross 154, расстояние (св. лет): 9.6813 (2.968303511 пк)
Method=2, StarName=Ross 154, Distance=9.6813, DistancePK=2.968303511
```

Рис. 2. Запит до експертної системи на виведення найближчих червоних карликів

Друга програма призначена для виведення переліку планет і ТНО залежно від складу атмосфери.

Розділ опису доменів та предикатів для експертної системи, яка дозволяє вивести список планет за фактом наявності або відсутності введених користувачем газів у складі їх атмосфери, наведено на рис. 3.

```
DOMAINS
    planet_name = string
    planet_type = terrestrial ; gas_giant ; dwarf
    atmosphere = has ; has_not
    gas = string
    item = integer

PREDICATES
    nondeterm planet(planet_name, planet_type, atmosphere)
    nondeterm planetAtmosphere(planet_name, gas)
    nondeterm hasAtmosphere
    nondeterm terrestrial_planets
    nondeterm gas_giant_planets
    nondeterm dwarf_planets
    nondeterm without_gas_in_atmosphere(gas)
    nondeterm with_gas_in_atmosphere(gas)
    nondeterm method(item)
    nondeterm atmstruct(planet_name)
```

Рис. 3. Фрагмент розробленої програми

Третя експертна система призначена для надання рекомендацій щодо спостереження за зірками на основі даних широти спостерігача. В розділі Predicates задекларовано предикати, розроблені програмістом, такі як: defineStar – невизначений предикат, на основі якого створена база даних зірок в розділі Clauses; inWidthRange – предикат, що є істинним у разі можливості спостереження сузір'я з заданих меж широти; monthMatches – предикат, правило на основі якого перевіряє, чи заданий місяць є оптимальним для спостереження за сузір'ям; writeConstellation – предикат, що призначений для організації виведення на консоль інформації про сузір'я, що передане в якості параметра constellation; addStar – невизначений предикат, правило на основі якого виконує додавання зірки до об'єкту сузір'я constellation; defineConstellation – невизначений предикат, що слугує для організації бази даних сузір'їв; city – невизначений предикат, що призначено для організації бази даних міст. Має один параметр типу string, який задає назву міста та latitude, що містить широту, на якій воно знаходиться (рис. 4).

```
PREDICATES
    nondeterm city(string,latitude)
    nondeterm defineStar(starDef,constellationName)
    nondeterm inWidthRange(constellationDef,real,real)
    nondeterm monthMatches(constellationDef, month)
    writeStar(starDef)
    writeConstellation(constellationDef)
    nondeterm addStar(starDef,constellation,constellation)
    nondeterm writeList(constellation)
    nondeterm defineConstellation(constellationDef, hemisphere)
    nondeterm menu(integer)
```

Рис. 4. Список предикатів розробленої експертної системи

На рис. 5 надано меню користувача, за допомогою якого виконується навігація за експертною системою.

```
Введите пункт меню:
1. Вывести крупнейшие звезды заданного созвездия
2. Найти созвездия, которые наблюдаются в заданных широтах в заданный месяц
3. Вывести список созвездий северного полушария
4. Вывести список созвездий южного полушария
5. Вывести список созвездий, наблюдаемых из выбранного города в заданный месяц
Выбор:
```

Рис. 5. Головне меню користувача експертної системи

На рис. 6 наведено найбільш сприятливі для спостереження сузір'я в околицях міста Харкова з вказанням найкращої пори року для спостережень.

```
Введите название города (например, Киев): Харьков
Введите месяц (например, Январь):Октябрь
Созвездие Ящерица. Наблюдается в широтах [90,-40].
Лучший месяц для наблюдения: Октябрь. Лучшее время для наблюдения: 21:00.

Choice=5
Созвездие Пегас. Наблюдается в широтах [90,-60].
Лучший месяц для наблюдения: Октябрь. Лучшее время для наблюдения: 21:00.
```

Рис. 6. Фрагмент результату виведення списку сузір'їв, що можна спостерігати з міста Харків

Висновки

Розроблені експертні системи призначені допомогти користувачам у вирішенні конкретних проблем астрономічної предметної області шляхом надання рекомендацій для отримання необхідної інформації та розроблені на основі евристичної моделі представлення знань.

Комплекс експертних систем, що був створений авторами, містить інформацію про основні фізичні характеристики небесних тіл та структуру атмосфери планет і ТНО Сонячної системи, що полегшує пошук інформації стосовно оптимального часу спостереження за сузір'ями та надає перелік найбільших зірок у них астрономам-любителям.

Література

1. Феоктистов. Л.А. Большая энциклопедия астрономии / сост. Л.А. Феоктистов. – М. : ЗАО «РОСМЭН-ПРЕСС», 2009. – 200 с.

2. Гудков П.А. Методологические указания к выполнению лабораторных работ «Системы искусственного интеллекта» / П.А. Гудков – П. : ПГУ, 2007. – 53 с.

3. William H. Paloski. Use of a Forth-Based Prolog for Real-Time Expert / William H. Paloski, Louis L. Odette, Alfred J. Krever, Allison K. West // Journal of Forth Application and Research. – 1986. – Volume 4, Number 4. – P. 307–308.

4. Петрова О.О. Експертна система «Визначення оцінки параметрів ризику виробничих об'єктів» / О.О. Петрова, Д.Л. Аксьонова // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2016. – № 4. – С. 146–148.

5. Сізова Н.Д. Експертна система «Інвестиційна привабливість обласних центрів України» / Н.Д. Сізова, О.О. Петрова, А.С. Камардін // Радиоэлектроника и информатика. – 2016. – № 2 (73). – С. 29–32.

References

1. Feoktistov. L.A. Bol'shaya entsiklopediya astronomii / Sost. L. A. Feoktistov. – M .: ZAO «ROSMEN-PRESS», 2009 g. – 200 str.

2. Gudkov P.A. Metodologicheskiye ukazaniya k vypolneniyu laboratornykh rabot «Sistemy iskusstvennogo intellekta» / P.A. Gudkov – P.: PGU, 2007. – 53 str.

3. William H. Paloski, Louis L. Odette, Alfred J. Krever, Allison K. West. Use of a Forth-Based Prolog for Real-Time Expert // Journal of Forth Application and Research Volume 4, Number 4, 1986. – P. 307-308.

4. Petrova O.O. Ekspertna systema «Vyznachennya otsinky parametriv ryzyku vyrobnychykh ob'yectiv» / Petrova O.O., Aks'onova D.L. // Visnyk Khmelnyts'koho natsional'noho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2016. - № 4. – S. 146–148.

5. Sizova N.D. Ekspertna systema «Investytsijna pryvablyvist'» oblasnykh tsentriv Ukrayiny» / N.D. Sizova, O.O. Petrova, A.S. Kamardin // Radioelektronika i informatika. – 2016. - № 2 (73). – S. 29-32.

Рецензія/Peer review : 21.11.2017 р. Надрукована/Printed :01.12.2017 р.
Рецензент: д.ф.-м.н., проф. Сізова Н.Д.

УДК 621.391 160164

С.М. ЛИСЕНКО, В.В ГУМЕНЮК
Хмельницький національний університет

МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ШКІДЛИВИХ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ НА ОСНОВІ АЛГОРИТМУ НАЙБЛИЖЧИХ СУСІДІВ

В роботі представлено метод виявлення шкідливого програмного забезпечення на основі алгоритму k-найближчих сусідів, який здійснює класифікацію програмного забезпечення на шкідливе і нормальне. Метод передбачає аналіз поведінки програмного забезпечення в комп'ютерній системі. В процесі роботи методу кожен досліджуваний процес представляється у вигляді вектора, у якому кожен елемент є значення статистичного показника, що відображає кількість системних викликів, які процес здійснює на протязі його виконання. Метод дозволяє забезпечити реагування на нові загрози, забезпечуючи захист комп'ютерних систем від як відомого так і невідомого ШПЗ. Робота системи виявлення ШПЗ здійснюється на основі виявлення аномалій через порівняння поведінки досліджуваного процесу із базою даних відомих поведінок програмного забезпечення в комп'ютерних системах.

Ключові слова: алгоритм k-найближчих сусідів, шкідливе програмне забезпечення, категоризація, системні виклики,.

S.M. LYSENKO, V.V. GUMENYUK
Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine

APPROACH FOR MALICIOUS SOFTWARE DETECTION USING *K*-NEAREST NEIGHBORS ALGORITHM

Abstract – this article describes a method for malware detection based on k-nearest neighbors algorithm (kNN) through binary classification of processes as malicious or benign.

The still-dominant method of malware detection is signature detection. This method relies on detecting unique patterns of data inside of scanned files. The rate of appearance of new malware specimens tends to outpace malware specialists' ability to create new signatures. This means that signature-based detection methods suffer from low detection rate of new types of malware. The field of machine learning provides more reliable means of protection against such threats.

The method described in this article employs k-Nearest Neighbor classification algorithm, successfully employed in the field of text classification, for the task of detection of malicious software. This method treats each process as a document to be classified. Feature vectors extracted from each process contain weighted frequencies of each system call performed during the process' runtime. Each unknown processes is compared with processes from a database of known benign processes, which is to be formed on the training phase. When the average similarity of k most similar processes reaches the certain threshold this process can be classified as benign, otherwise – as malicious. For the measuring of the similarities of feature vectors, cosine similarity was used. Two weighting methods: tf-idf and frequency for extraction of feature vectors were compared. It was shown that performance of this method depends on the choice of weighting method, the value of k and the threshold value. Different trade-offs can be achieved by varying these parameters. It was shown that tf-idf weighting method provides the optimal balance between detection rate and false positive rate. On the other hand, frequency weighting provides higher detection rate and the ease of forming the training database at the cost of much higher false positive rate. It makes sense to investigate different weighting methods and measures of similarity further. Experiments have shown applicability of the proposed method and the possibility of implementing it in software at the detection rate of 96-98% with the false positive rate of 3-6%.

This method allows for detection of new, previously unknown types of malware, providing protection of computer systems from both known and unknown malware.

Keywords: k-Nearest neighbor classifier, malware, system calls, attack, document categorization.

Вступ

Захист комп'ютерних систем є критично важливим і актуальним завданням, враховуючи складності виявлення загроз в реальному часі. Найсучасніші методи захисту не здатні в повній мірі забезпечити високий рівень ефективності та достовірності виявлення шкідливого програмного забезпечення (ШПЗ). Багато галузей індустрії покладаються на антивірусні засоби, які ефективні проти загроз із відомими сигнатурами, але які не здатні виявляти нові загрози, що з'являються щоденно та неефективні проти багаточисленних 0-day та поліморфного ШПЗ. [1]

Підходи на основі аналізу поведінки намагаються виявити ШПЗ на основі аналізу виконання ними послідовностей інструкцій чи системних викликів [2-4]. Ці підходи в основному покладаються на традиційні моделі машинного навчання, такі як приховані Марковскі моделі, метод опорних векторів, дерева рішень. Тим не менш, існуючі методи на основі машинного навчання характеризуються високим рівнем хибних спрацювань. Ситуація пояснюється різноманітності та складності сучасного програмного забезпечення, як шкідливого так і безпечного, неоптимального вибору ознак аналізу поведінки ПЗ, обмеженими (або застарілими) наборами даних.

Оскільки ШПЗ постійно еволюціонує, існуючі механізми захисту не справляються із зростаючою складністю загроз. Більш того, уся множина ШПЗ не є однорідною – складність ШПЗ залежить від цілі, типу служби, що підлягає атаці, джерела атаки, та місця знаходження цілі.

Вразливості комп'ютерних систем виникають внаслідок недолік політик безпеки, поганої конфігурації систем чи недосконалих програм. Системи виявлення ШПЗ грають вагому роль в знаходженні атак, що використовують ці вразливості чи недоліки.

Ідеальна система безпеки – це така, що має 100% успіх у виявлені ШПЗ та 0% хибних спрацювань (коефіцієнт неправильної класифікації нормальної поведінки), не вимагає ручного моніторингу та не використовує занадто багато системних ресурсів. Проте, відомі системи виявлення ШПЗ мають високий рівень хибних спрацювань та низький рівень виявлення загроз.

Існує два загальних підходи до виявлення ШПЗ: виявлення за сигнатурами та виявлення аномалій. Виявлення за допомогою є корисним для виявлення відомого ШПЗ, однак такий підхід неефективний проти нових видів шкідливого програмного забезпечення. На відміну від виявлення за сигнатурами, виявлення аномалій виявляє поведінки ПЗ, що суттєво відрізняються від відомих. Для забезпечення виявлення шкідливої поведінки в комп'ютерній системі (КС) першою задачею є побудова множини нормальних поведінок. З цією метою доцільним є використовуються технологій машинного навчання, які в подальшому здатні класифікувати нову поведінку на нормальну чи аномальну ([4]). Незважаючи на їх здатність виявляти невідоме ШПЗ, системи виявлення аномалій часто характеризуються високим рівне хибних спрацювань завдяки високому.

Однією з можливостей, які шкідливе програмне забезпечення може гарантування невидиме для антивірусних засобів функціонування є повільна зміна поведінки в КС з метою приховування власної шкідливої діяльності.

Останнім часом створення методи виявлення ШПЗ на основі відслідковування їх поведінки стають стало альтернативними для його ефективного виявлення [6-10].

Пов'язані роботи

Питанню використання методів аналізу поведінки ПЗ в КС для захисту комп'ютерних систем від шкідливого ПЗ сьогодні присвячено велика кількість наукових робіт.

Зокрема, в [11] вперше було запропоновано описувати очікувану поведінку деяких привілейованих програм (наприклад, setuid root-програм, демонів в Unix, тощо) за допомогою мови опису програмної політики. Під час виконання програми будь-яке відхилення від зазначеної поведінки розглядалося як «зловживання». Основним обмеженням цього методу є складність опису очікуваної поведінки та написання специфікацій для всіх піддослідних програм. Тим не менш, це дослідження відкрило нові можливості для розроблення методів виявлення ШПЗ на основі описів поведінок.

В [6] була описана ідея використання коротких послідовностей системних викликів, виконаних запущеними програмами, як дискримінатор для виявлення ШПЗ. Нормальна поведінка визначалася в термінах коротких послідовностей системних викликів певної довжини під час виконання процесу в КС, і окрема база даних звичайної поведінки була побудована для кожного досліджуваного процесу. Ця робота була розширена різними схемами класифікації, такими як штучна імунна система [7], виведення правил [8] та прихована Марковська модель (HMM) [9]. В [10] застосовано методи штучної нейронної мережі для вивчення профілів поведінки програм із послідовностями системних викликів для даних DARPA BSM. Для кожної програми нейронна мережа була навчена та використана для виявлення аномалій. Їхні рекурентні мережі Елмана змогли виявити 77,3% всіх вторгнень без помилкових спрацьовувань і 100% всього ШПЗ із приблизно 10% помилкових спрацювань.

На відміну від більшості робіт, які були зосереджені на створенні профілів окремих програм, в [12] запропоновано метод, що базується на дискримінантному аналізі. Не вивчаючи всі системні виклики, класифікація процесу виконується шляхом аналізу лише 11 системних викликів у запущеній програмі та обчислення відстаней Махаланобіса до груп звичайних і шкідливих тренувальних процесів. Було зроблено 4 помилкових класифікації із 42 зразків. Проте, з огляду на невеликі розміри зразкових даних, все ще не встановлена ефективність такого підходу.

У [13] зроблено спробу порівняти ефективність методів виявлення ШПЗ, які використовували частоти системних викликів, та ті, що використовували порядок системних викликів. Імена системних викликів були вилучені із журналів як нормальних, так і шкідливих програм, і позначені як нормальні та шкідливі, відповідно. Щоправда, метод не передбачає групування системних викликів за програмами, що їх виконували. Оскільки як частота, так і упорядкованість системних викликів залежать від програми, це спрощення обмежує вплив їх роботи.

Із вище перерахованого можна зробити висновок, що на сьогоднішній день практично всі дослідження з вивчення поведінки програм використовують короткі послідовності системних викликів в якості ознак, та формують великі бази даних послідовностей системних викликів для кожної програми. Нормальна поведінка характеризується локальним порядком системних викликів, та відходження від нього розглядається як аномалія. Цей підхід вимагає значних накладних затрат і вимагає складного процесу створення нових профілів для кожної нової версії програми.

З огляду на це виникає задача розробки нового методу виявлення шкідливого ПЗ, що комбінує високу ефективність виявлення нового шкідливого ПЗ, низький рівень хибних спрацювань та низьку обчислювальну складність при використанні.

Метод виявлення шкідливого програмного забезпечення на основі алгоритму k-найближчих сусідів

В роботі представлено метод виявлення шкідливого програмного забезпечення на основі алгоритму k-найближчих сусідів, який здійснює класифікацію ПЗ на шкідливе і нормальне. Метод передбачає аналіз поведінки програмного забезпечення в комп'ютерній системі. В процесі роботи методу кожен досліджуваний процес представляється у вигляді вектора, у якому кожен елемент є значення статистичного показника, що відображає кількість системних викликів, які процес здійснює на протязі його виконання.

Метод дозволяє забезпечити реагування на нові загрози, забезпечуючи захист комп'ютерних систем від як відомого так і невідомого ШПЗ. Робота системи виявлення ШПЗ здійснюється на основі виявлення

аномалій через порівняння поведінки досліджуваного процесу із базою даних відомих поведінок програмного забезпечення в комп'ютерних системах.

Для опису поведінки програмного забезпечення в роботі пропонується розглядати системні виклики, які здійснюються ПЗ, не з точки зору локального порядку викликів, а з точки зору частоти викликів. Використовуючи апарату метафор обробки тексту, кожний системний виклик розглядатимемо як "слово" у довгому документі, а набір системних викликів, виконаних процесом, розглядатимемо як "документ". Ця аналогія дозволяє використовувати поний спектр засобів обробки тексту для задачі виявлення шкідливого ПЗ. В роботі з цією метою залучено одним із таких методів – алгоритм *k*-найближчих сусідів.

Використовуючи подібність у підходах до класифікації текстів, кожен процес можна представити у вигляді вектору, в якому кожен елемент представляє собою факт виконання певної кількості системних викликів під час його виконання. З метою визначення значень елементів вектору метод оперує частотне зважуванням та tf-idf. Для визначення процесу як нормальний або шкідливий класифікатор КНС здійснює обчислення схожості між даним процесом та кожним із, присутнім у навчальній вибірці та використовує класи k-найближчих унавчальних зразків для класифікації даного процесу. Основне припущення полягає в тому, що процеси, що належать одному класу, будуть групуватися разом у векторному просторі. Таблиця 1 ілюструє подібність деяких аспектів між класифікацією тексту та виявленням ШПЗ при застосуванні класифікатора КНС.

Є визначені переваги для застосування методів класифікації тексту до процесу виявлення ШПЗ. Перш за все, множина системних викликів є чітко обмеженою. Таким чином, розмірність векторів наперед відома і є визначеною. По-друге, процес виявлення ШПЗ може розглядатися як задача бінарної категоризації, що робить застосуванням методів класифікації тексту відносно виправданим, застосовним і простим в реалізації.

Таблиця 1

Аналогії між категоризацією текстів і програмним забезпеченням

Символ	Текст	ШПЗ
N	Кількість документів	Кількість процесів
M	Кількість слів	Кількість системних викликів
n_i	Кількість *i*-ого слова	Кількість *i*-ого виклику
f_{ij}	Частота *i*-ого слова в документі *j*	Частота *i*-ого виклику в процесі *j*
D_j	*j*-ий тренувальний документ	*j*-ий тренувальний процес
X	Тестовий документ	Тестовий процес

Таким чином, метод виявлення шкідливого програмного забезпечення на основі алгоритму *k*-найближчих сусідів включає в себе два етапи:

1. Навчання класифікатора КНС *k*-найближчих сусідів.
2. Використання класифікатора КНС *k*-найближчих сусідів для виявлення ШПЗ.

Розглянемо детальніше кроки першого етапу.

Отримання журналів виконання процесів на «чистій» системі в процесі її нормального функціонування. Вирішення задачі виявлення ШПЗ ґрунтується на детекції шкідливої поведінки виключно на основі порівняння з множиною нормальних поведінок ПЗ. Щоб забезпечити максимально покриваючу множину таких поведінок для виявлення аномалій необхідно використовувати великий набір тренувальних даних.

Отже, метод передбачає для забезпечення навчальної вибірки і для подальшого навчання КНС класифікатора використання так званої «чистої» комп'ютерної системи, на якій моделюється нормальна поведінка процесів. Для отримання журналів множини «нормальних» поведінок використовується служба трасування виконання процесів.

Навчання класифікатора. З метою здійснення процесу навчання класифікатора формується матриця *A,* в якій кожний елемент a_{ij} містить статистичний показник отриманий із кількісті виконань n_{ij} певного системного виклику *i* під час виконання процесу *j* (частота (1) чи tf-idf (2)):

$$a_{ij} = f_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_{l=1}^{M} n_{ij}}, \tag{1}$$

$$a_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sqrt{\sum_{l=1}^{M} f_{lj}^2}} \times \log\left(\frac{N}{n_i}\right), \tag{2}$$

де N – кількість навчальних поведінок (стовпців матриці), M – кількість системних викликів (рядки матриці).

Розглянемо детальніше кроки другого етапу.

Здійснення моніторингу подій в системі. Для кожного досліджуваного процесу формується вектор *X*, кожен із елементів якого є показник отриманий із кількісті виконань певного системного виклику *i* під час виконання процесу *j*. Для реалізації даного пункту необхідним є вирішення задачі трасування виконання процесів з метою отримання журналів поведінок програмного забезпечення в комп'ютерній системі в

реальному часі.

Використання алгоритму КНС для класифікації програмного забезпечення. Основним компонентом методу є здійснення класифікації програмного забезпечення на основі залучення алгоритму КНС. Ця задача зводиться до оцінки подібності між вектором X та кожним стовпцем у матриці A. З цією метою використовується косинусна подібність (3) Якщо середня подібність до k найбільш подібних векторів в A перевищує певне порогове значення, досліджуваний процес класифікується як нормальний, інакше – як шкідливий.

$$sim\left(X, D_j\right) = \frac{\sum_{t_i \in \left(X \cap D_j\right)} x_i \times d_{ij}}{\left\|X\right\|_2 \times \left\|D_j\right\|_2}, \tag{3}$$

де X – досліджуваний процес, D_j – j-ий тренувальний процес, t_i – спільний виклик між X та D_j, x_i – вага виклику t_i в X, d_{ij} – вага виклику t_i в D_j, $||X||_2$ – довжина вектору X; $||D||_2$ – довжина вектору D_j.

Якщо оцінка подібності із одним тренувальним нормального процесом дорівнює 1, це означає, що частота системних викликів досліджуваного та навчального процесів відповідають повністю, і досліджуваний процес буде класифікований як «нормальний» процес. В іншому випадку навчальні поведінки сортуються за значеннями подібності за спаданням, і вибирається k поведінок із найбільшою подібністю, щоб визначити, чи є процес нормальним чи шкідливим. Потім здійснюється обчислення середнього значення подібності k найближчих сусідів (з найбільшими оцінками подібності) і встановлюється порогове значення. Тільки тоді, коли середнє значення подібності перевищує порогове значення, новий процес вважається нормальним. Псевдокод для алгоритму КНС представлений у вигляді наступного алгоритму:

```
побудувати тренувальний набір нормальних процесів D;
for кожний процес X в тестовому наборі даних do
  if X містить невідомий виклик then
    X – ненормальний;
  else
    for кожний процес Dj в D do
      обрахувати sim(X,Dj);
      if sim(X,Dj)=1 then
        X – нормальний; exit;
      Знайти sim_avg – середнє значення k найбільших sim(X,Dj);
      if sim_avg>поріг then
        X – нормальний
      else
        X – ненормальний
```

Прийняття заходів на основі результатів роботи КНС. Запропонований метод не здатний виявити ШПЗ до його виконання. Проте, функціонування ШПЗ складається з багатьох етапів, тому блокування в процесі виконання шкідливого ПЗ є ефективним заходом в захист КС. У випадку класифікації процесу як шкідливого метод передбачає його повне блокування та відправку на аналіз адміністратору мережі., а також його подальше внесення в «чорний список», що завадить її повторному виконанню.

Експериментальні дослідження

З метою дослідження ефективності запропонованого методу було проведено ряд експериментів.

Перша частина експериментів полягала в зборі та опрацювання поведінки «чистих» комп'ютерних систем з метою навчання класифікатора КНС, для чого був використаний набір навчальних даних DARPA IDSE [14]

На другому етапі здійснювалося безпосередня оцінка ефективності розробленої системи. З цією метою було згенеровано множину шкідливих поведінок в комп'ютерній системі та використано дані DARPA, що являють собою велику вибірку комп'ютерних атак, вбудованих у звичайний фоновий трафік, які використовує ШПЗ. Серед фонових даних містилися ШПЗ, що здійснювало 28 типів мережевих атак та 12 сценаріїв шкідливої локальної активності в КС.

В процесі виконання експериментів було використано дані, зібрані з досліджуваної комп'ютерної системи, що функціонує в локальній мережі. Журнали містили інформацію про стан комп'ютерної системи під час її роботи. Із цих журналів виділялися лише назви системних викликів для кожного процесу. Інші атрибути подій, такі як аргументи системних викликів, шляхи та атрибути об'єктів, повернені значення тощо, не використовувались.

Дані DARPA було позначені номерами сесій. Кожна сесія відповідала TCP/IP-з'єднанню між двома комп'ютерними системами, що брали участь в експериментах.

Кожна сесія складалася з одного або декількох процесів. Для кожного процесу згенерований повний впорядкований список системних викликів.

Були підраховані кількості окремих системних викликів під час виконання процесу. Потім із цих кількостей було сформовано вектори ознак процесів. Для кодування процесів було використано два показники, відносні частоти викликів (1) та tf-idf (2).

На протязі тренування було спостережено 50 різних системних викликів, що означає що розмірність кожного вектору процесу має бути 50.

Після того, як було отримано навчальні дані про множину нормальних поведінок КС в комп'ютерній мережі, запропонований метод виявлення ШПЗ було застосовано до класифікації нового ШПЗ.

Результати ефективності роботи методу у подано у вигляді ROC-кривих. Зокрема, в результаті експериментальних досліджень було отримані різні співвідношення між рівнями виявлення ШПЗ та хибних спрацювань. З цією метою було досліджено значення порогу, при якому досягалася найвища ефективність методу.

Ефективність алгоритму класифікатора КНС також залежить від значення k, числа найближчих сусідів трестованого процесу. Зазвичай оптимальне значення k визначається емпірично. З цією метою було проведено ряд експериментів зі зміною величини k від 5 до 25. На рисунку 2 показані криві ROC для 3 різних k значень, коли в якості ознак було використано показник tf-idf.

Результати досліджень продемонстрували, що для досягнення найвищих показників виявлення значення k = 10 є кращим вибором, ніж інші значення, оскільки відсоток виявлення досягає максимального значення (98%) швидко, коли пороговий рівень піднімається до 0,72, а відсоток хибних спрацювань становить лише 3.04% для всього набору тестувальних даних.

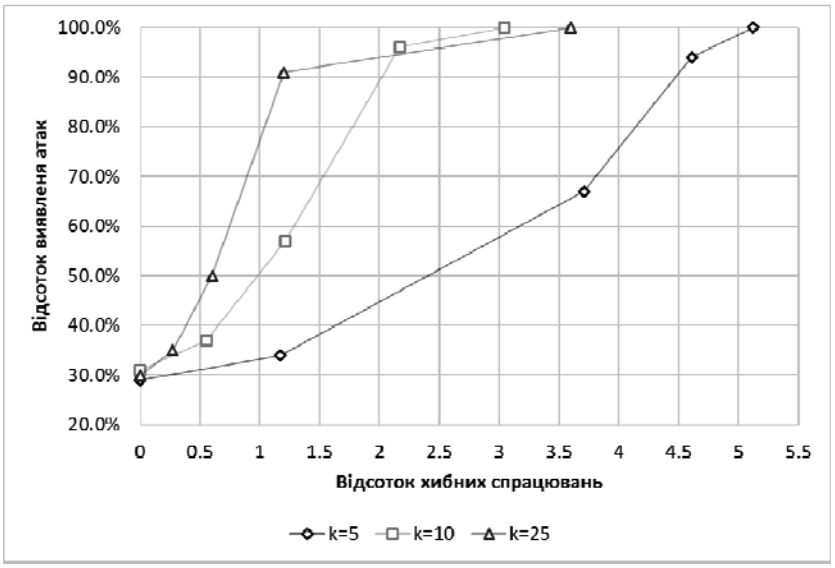


Рис. 1. Результати роботи методу при різних значеннях k

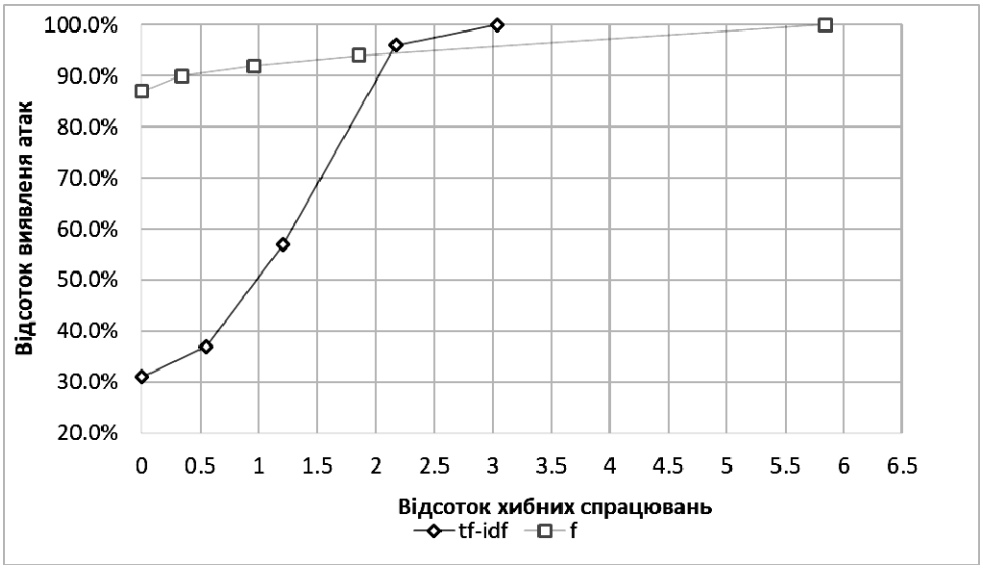


Рис. 2. Порівняння класифікаторів із використанням частоти та tf-idf

Експерименти також включали дослідження застосування відносної частоти системних викликів в якості ознак. Аналогічним чином, для методу частотного зважування, k = 15 забезпечує найнижчий відсоток хибних спрацювань 5,84% коли відсоток виявлених ШПЗ досягає 96% при пороговому значенні 0,99. Причиною високого порогового значення є те, що деякі поведінки ШПЗ дуже схожі на звичайні процеси при коли використовуються відносні частоти в якості ознак зважуванні. Результати порівняння двох різних методів показано на рисунку 3. У той час як метод із використанням частоти демонструє високий відсоток виявлення ШПЗ (87%) при найнижчому рівні помилкових спрацьовувань, метод що використовує tf-idf

забезпечує нижчий відсоток хибних спрацювань при високому рівні виявлення ШПЗ. Звідси видно, що використання tf-idf дозволяє краще розрізняти процеси, ніж частоти. Отже, tf-idf вимагає нижче порогове значення і надає нижчий відсоток хибних спрацювань.

Таким чином, розроблений метод виявлення шкідливого програмного забезпечення на основі методу *k*-найближчих сусідів дає змогу здійснювати виявлення ШПЗ з високою достовірністю.

Висновки

В роботі представлено метод виявлення шкідливого програмного забезпечення на основі алгоритму k-найближчих сусідів, який здійснює класифікацію ПЗ на шкідливе і нормальне. Метод передбачає аналіз поведінки програмного забезпечення в комп'ютерній системі. В процесі роботи методу кожен досліджуваний процес представляється у вигляді вектора, у якому кожен елемент є значення статистичного показника, що відображає кількість системних викликів, які процес здійснює на протязі його виконання.

Метод дозволяє забезпечити реагування на нові загрози, забезпечуючи захист комп'ютерних систем від як відомого так і невідомого ШПЗ. Робота системи виявлення ШПЗ здійснюється на основі виявлення аномалій через порівняння поведінки досліджуваного процесу із базою даних відомих поведінок програмного забезпечення в комп'ютерних системах.

Експериментальні дослідження запропонованого методу показали застосовність методу та можливість його програмної реалізації у вигляді програмного забезпечення на рівні 96-98%, при 3-6% хибних спрацювань.

Для оцінки та виокремлення характерних для ШПЗ поведінок метод застосовує статистичні показники tf-idf, що дозволяє отримати оптимальне співвідношення між рівнем виявлення та рівнем хибних спрацювань. Експериментальні дослідження показали необхідні статистичні показники та їх параметри для досягнення високої ефективності виявлення ШПЗ при низькому рівні хибних спрацювань.

На основі виявлених шкідливих процесів можна автоматично побудувати сигнатури для більш ранніх методів виявлення ШПЗ.

Недоліком методу є нездатність виявлення ШПЗ до того початку його запуску на виконання.

References

1. Xiaoyong Yuan "Deep Learing-based Real-Time Malware Detection with Multi-Stage Anaysis" SMARTCOMP 2017

2. S. Kumar and E. H. Spafford, "An application of pattern matching in intrusion detection," 1994

3. M. Christodorescu, S. Jha, and C. Kruegel, "Mining specifications of malicious behavior," in Proceedings of the the 6th Joint Meeting of the European Software Engineering Conference and the ACM SIGSOFT Symposium on The Foundations of Software Engineering, ser. ESEC-FSE '07, 2007, pp. 5–14.

4. V. N. P. Dao and V. R. Vemuri, "Computer Network Intrusion Detection: A Comparison of Neural Networks Methods", Differential Equations and Dynamical Systems, (Special Issue on Neural Networks, Part-2), vol.10, No. 1&2, 2002.

5. Shabtai A, Moskovitch R, Elovici Y, Glezer C: Detection of malicious code by applying machine learning classifiers on static features: A state-of-the-art survey. Information Security Technical Report 2009, 14(1):1-34.

6. S. Forrest, S. A. Hofmeyr, A. Somayaji, and T. A. Logstaff, "A Sense of Self for Unix process", Proceedings of 1996 IEEE Symposium on Computer Security and Privacy , 120- 128, 1996

7. S. Forrest, S. A. Hofmeyr and A. Somayaji, "Computer Immunology", Communications of the ACM , Vol. 40, 88-96, 1997.

8. W. Lee, S. J. Stolfo and P. K. Chan, "Learning Patterns from Unix Process Execution Traces for Intrusion Detection", Proceedings of AAAI97 Workshop on AI Methods in Fraud and Risk Management , 50-56, 1997.

9. C. Warrender, S. Forrest and B. Pearlmutter, "Detecting Intrusions Using System Calls: Alternative Data Models", Proceedings of 1999 IEEE Symposium on Security and Privacy , 133-145, 1999.

10. A. K. Ghosh, A. Schwartzbard and A. M. Shatz, "Learning Program Behavior Profiles for Intrusion Detection", Proceedings of 1st USENIX Workshop on Intrusion Detection and Network Monitoring , Santa Clara, CA, April 1999.

11. C. Ko, G. Fink and K. Levitt, "Automated Detection of Vulnerabilities in Privileged Programs by Execution Monitoring", Proceedings of 10th Annual Computer Security Applications Conference , Orlando, FL, Dec, 134-144, 1994.

12. M. Asaka, T. Onabuta, T. Inoue, S. Okazawa and S. Goto, "A New Intrusion Detection Method Based on Discriminant Analysis", IEEE TRANS. INF. & SYST ., Vol. E84-D, No. 5, 570-577, 2001.

13. N. Ye, X. Li, Q. Chen S. M. Emran and M. Xu, "Probabilistic Techniques for Intrusion Detection Based on Computer Audit Data", IEEE Trans. SMC-A , Vol. 31, No. 4, 266-274, 2001.

14. MIT Lincoln Laboratory, https://www.ll.mit.edu/ideval

Рецензія/Peer review : 11.11.2017 р. Надрукована/Printed : 01.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Боровик О.В.

УДК 721.01:004.9Autodesk

Н.С. СВИРНЕВСКИЙ
Хмельницкий национальный университет

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ СОЗДАНИЯ КОМПЛЕКСНОГО ЧЕРТЕЖА ИЗ ПРОЕКЦИЙ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ОБЪЕКТА В AUTOCAD

В статье описывается алгоритм и программа создания комплексного чертежа из проекций пространственного объекта в системе автоматизированного проектирования Autocad. Программа реализована на встроенном в Autocad языке AutoLisp. На вход программы поступает твердотельный объект, на выходе получаем две и более проекции, которые размещены на комплексном чертеже в проекционной связи. В основе алгоритма лежит создание достаточного количества копий твердотельного объекта и размещение их соответствующим образом по отношению плоскости чертежа. Затем, создаются проекции в пространстве ЛИСТА (команда Solprof), с помощью функций доступа к данным чертежа определяется имя слоя невидимых линий и этот слой отключается.

Ключевые слова: автокад, автолисп, твердотельный объект, проекция, комплексный чертеж.

N.S. SVIRNEVSKYI
Khmelnytskyi National University

DEVELOPMENT OF THE CREATING PROGRAM OF A COMPLEX DRAWING FROM PROJECTIONS OF THE SOLID OBJECT IN AUTOCAD

This article describes algorithm and program for creating a complex drawing from the projections of a spatial object in the automated design system Autocad. The program is implemented on the built-in Autocad language AutoLisp. The input of the program receives a solid object, on the output we get two or more projections, which are placed on the complex drawing in the projection connection.

The algorithm is based on the creation of a sufficient number of copies of a solid object and placing them accordingly in relation to the plane of the drawing. Then, projections are created in the PAPER space (the Solprof command), using the data access functions of the drawing, the name of the layer of invisible lines is defined and this layer is disabled.

The program significantly speeds up the process of creating a complex drawing from the projections of a spatial object in comparison with solving this problem by sequentially executing commands in the interactive mode of operation.

Keywords: Autocad, AutoLisp solid object, projection, complex drawing.

Введение

Чертеж пространственного объекта можно выполнить двумя способами:

1. Начертить непосредственно в плоскости (используя команды для плоского черчения).
2. Определить по модели пространственного объекта через аппарат ортогонального проецирования (рис. 1).

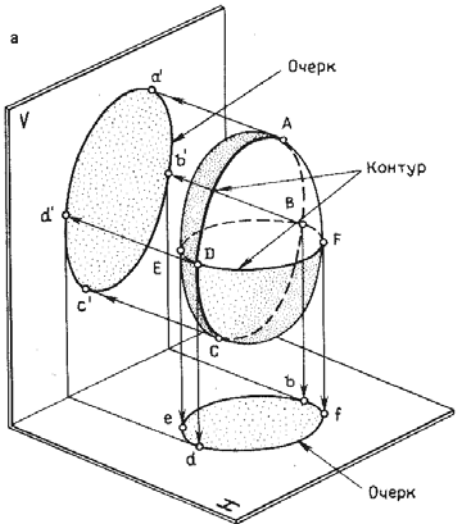


Рис. 1. Определение чертежа по модели пространственного объекта

Первый способ очень трудоемкий. Второй способ реализуется в AutoCAD поэтапно:

1. Моделирование объекта.
2. Определение вида.
3. Построение проекции.

Уточним, что здесь подразумевается под терминами "вид" и "проекция". **Вид** – видимая часть пространственного объекта со стороны выбранного направления проецирования. **Проекция** – плоская модель объекта, получаемая в результате обработки пространственного объекта в соответствии с выбранным направлением проецирования.

В чем принципиальное различие между видом и проекцией? Зачем нужно создавать проекцию, если есть вид на объект, который также представлен на плоском экране? Отличие состоит лишь в примитивах, представленных в базе данных чертежа. Пространственные модели описываются при помощи трехмерных примитивов, а проекции представлены двумерными примитивами. Те и другие обладают специфическими свойствами, которые позволяют их использовать лишь для определенных целей. Например, нельзя назначить толщину очерковой линии пространственного объекта, поскольку этот элемент отсутствует в его описании. Также нельзя удалить какую-либо линию объекта или изменить её свойства, поскольку свойства пространственного объекта можно изменять только в целом. Поэтому, во многих случаях целесообразно создавать проекции на основе пространственной модели объекта.

Анализ исследований и публикаций

В AutoCAD процедура создания комплексного чертежа из проекций твердотельного объекта в диалоговом режиме роботы в AutoCAD есть трудоемкой. Она состоит из нескольких операций [1]:

1. Создаются окна, в каждом из которых устанавливаются соответствующие направления проецирования (рис. 2).
2. Для каждого из окон создаются проекции (команда SOLPROF) в соответствии с выбранным направлением проецирования. Предварительно включается пространство ЛИСТА и режим МОДЕЛИ (только при этих условиях возможно выполнение команды SOLPROF).
3. Проекции переносятся на комплексный чертеж (через буферную память). Перед тем, как перенести проекцию, необходимо установить в окне плоскость проекций (*XY*) параллельно окну (опция View команды UCS).

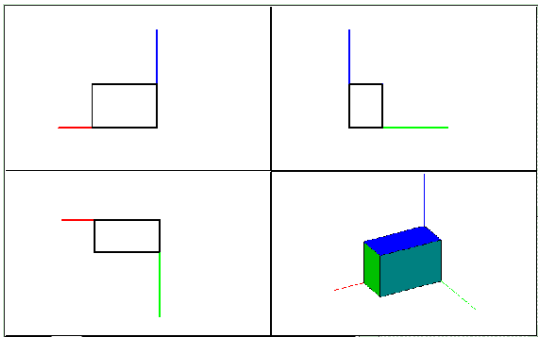


Рис. 2. Окна с соответствующими видами

Формулирование цели

Ставится задача реализовать процедуру создания комплексного чертежа программно. Чтобы на вход программы поступала пространственная модель детали (рис.3), на выходе получали комплексный чертеж из 2-х и более проекций (рис. 4).

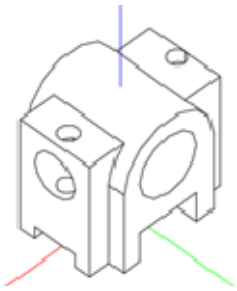


Рис. 3. Пространственная модель детали

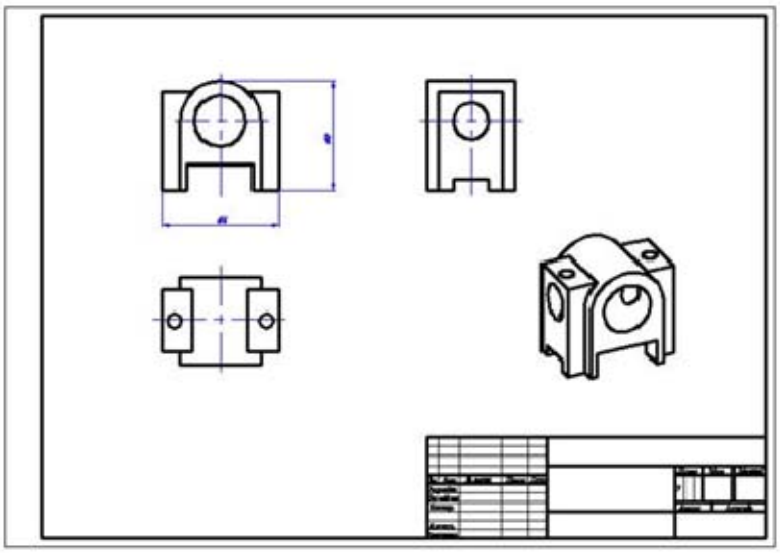


Рис. 4. Комплексный чертеж

Изложение основного материала

Для выбора лучшего алгоритма решения поставленной задачи рассмотрим два возможных способа определения различных видов (или проекций) объекта для построения комплексного чертежа:

1. Вектор проецирования (и плоскость проекций) перемещается, объект неподвижен (рис. 5).
2. Вектор проецирования неподвижен, объект перемещается (рис. 6).

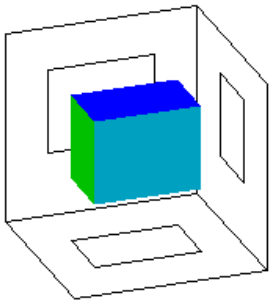


Рис. 5. Вектор перемещается

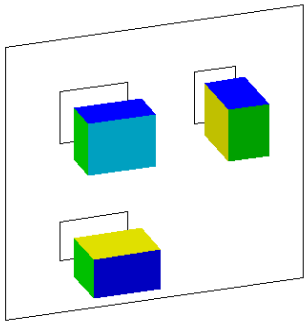


Рис. 6. Объект перемещается

При выборе 2-го способа построения проекций того же эффекта можно достичь следующим образом (см. рис.6):

1. Создается необходимое количество копий объекта.
2. Копии размещаются соответствующим образом по отношению к выбранному направлению проецирования.
3. Создаются модели проекций в соответствии с выбранным видом, модели объектов удаляются (выключаются).

Второй способ более простой для программной реализации, поэтому используем его. Программа, написанная на языке AutoLisp, представлена ниже.

Файл pro3.lsp

```
(defun C:Pro3 ()
 ; Загрузка ARX программ
(setq n (length (arx)) g T ac T)
 (while (>= (setq n (1- n)) 0)
 (If (= "geom3d.arx" (nth n (arx))) (setq g NIL))
 (If (= "acsolids.arx" (nth n (arx))) (setq ac NIL)))
 (If g (arxload "geom3d"))
 (If ac (arxload "acsolids"))
 (setvar "HIGHLIGHT" 0) ;выбранные объекты не подсвечиваются
(setvar "HIGHLIGHT" 1)
 (setvar "CMDECHO" 0) ;подавляет сообщения в командной строке
(setvar "CMDECHO" 1)
 (COMMAND "vpoint" "0,0,1")
 ;Копирование модели для 3х видов и изометрии
(setq MoP2 (entlast))
 (COMMAND "copy" MoP2 "" "0,0" "0,0")
 (setq MoP1 (entlast))
 (COMMAND "copy" MoP2 "" "0,0" "0,0")
 (setq MoP3 (entlast))
 (COMMAND "copy" MoP2 "" "0,0" "0,0")
 (setq MoIz (entlast))
 (command "zoom" "e")
 ;Вращение каждой из 3х копий модели осуществляется
;(command "rotate3d" MoP2 "" "X" '(0 0 0) -90)
 (rotate3d MoP2 "X" '(0 0 0) -90)
 (rotate3d MoP3 "Y" '(0 0 0) 90)
 (rotate3d MoP3 "Z" '(0 0 0) 90)
 (rotate3d MoIz "Z" '(0 0 0) 45)
 (rotate3d MoIz "X" '(0 0 0) -52.5)
 ;Расстояние между проекциями
(setq rP2P1 -60)
 (setq rP2P3 100)
 (setq rP2Iz 200)
 ;Координаты точки вставки проекции
(setq Tv1 (list 0 rP2P1 0))
 (setq Tv3 (list rP2P3 0 0))
 (setq TvIz (list rP2Iz 0 0))
 ;Перемещение проекций на свои места
(COMMAND "move" MoP1 "" "0,0" Tv1)
 (COMMAND "move" MoP3 "" "0,0" Tv3)
 (COMMAND "move" MoIz "" "0,0" TvIz)
 (COMMAND "move" MoP1 MoP2 MoP3 MoIz "" "0,0" "100,200")
 (COMMAND "zoom" "e")
 ;Переключение в пространство ЛИСТА
(setvar "TILEMODE" 0)
 (entdel (entlast)) ;Удаляется рамка
(COMMAND "mview" '(0 0) '(420 297))
 (COMMAND "mspace")
 (solprof MoP1 "Y" "Y" "Y")
 (solprof MoP2 "Y" "Y" "Y")
```

```
 (solprof MoP3 "Y" "Y" "Y")
 (solprof MoIz "Y" "Y" "Y")
 (setvar "TILEMODE" 1)
 ;Определение имени слоя, в котором SOLPROF строит профили
(SETQ N (ssget "X" '((0 . "VIEWPORT"))))
 (setq im (ssname N 0)) ;извлекаем имя примитива
(setq nb (entget im)) ;извлекаем параметры примитива "VIEWPORT"
 (setq sln (assoc 5 nb));извлекаем дескриптор примитива "VIEWPORT"
 ;Составление имён слоев, в которых размещены проекции
(setq slPv (strcat "Pv-" (cdr sln)))
 (setq slPh (strcat "Ph-" (cdr sln)))
 ; Отключаем слои невидимых линий и 0, а также устанавливаем толщину в слое видимых линий.
 (COMMAND "LAYER" "off" slPh "off" 0 "Y" "LW" 0.5 slPv "")
 )
```

В Мировой (World) системе координат (рис. 7) создается (или копируется с другого чертежа) с привязкой к началу координат модель объекта (например, конус). Полученный после запуска программы результат представлен на рис. 8.

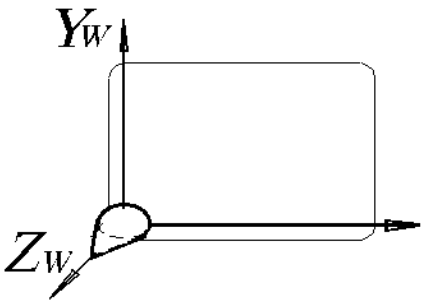


Рис. 7. Мировая система координат

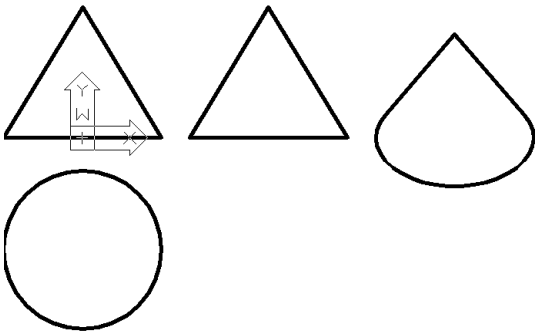


Рис. 8. Результат запуска программы

С помощью программы создаются поименованные копии объекта. Копии вращаются (команда Rotate3d) вокруг осей координат и разносятся (Move) на необходимые расстояния по отношению друг к другу. Затем создаются проекции (Solprof). Предварительно включается пространство ЛИСТА и режим Модели. Поскольку команды Rotate3d и Solprof являются внешними (описываются в ARX-приложениях), то для их использования должны быть загружены соответствующие файлы (функция arxload).

Вместе с проекциями образуются дополнительные слои для видимых и невидимых линий проекций. Программа обеспечивает обводку линий из слоя видимых линий и отключение других слоев. Для выполнения этих задач в программе определяются имена образовавшихся слоев. Имя слоя состоит из приставки *PV-* (для слоя невидимых линий *PH-*), а также наименования окна, например *PV-4B* и *PH-4B*. Наименование окна определяется с помощью функций доступа к данным чертежа.

Выводы

Разработана программа создания комплексного чертежа из проекций пространственного объекта в системе автоматизированного проектирования Autocad. Программа значительно ускоряет процесс создания комплексного чертежа по сравнению с решением этой задачи путем последовательного выполнения команд в диалоговом режиме работы.

Литература

1. Свирневский Н.С. Моделирование и обработка изображений в среде AutoCAD 2000 / Н.С. Свирневский. – Хмельницький : ТУП, 2000. – 359 с.

References

1. Svirnevskiy N.S. Osnovy razrabotki hraficheskih prilozheniy / N.S. Svirnevskiy – Khmelnytskyi : TUP, 2000. – 359 s.

Рецензія/Peer review : 20.10.2017 р. Надрукована/Printed :03.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Сорокатый Р.В.

UDC 004.93:12

A. KASHTALIAN
Khmelnytsky National University

SEGMENTATION OF TEXT INFORMATION IN NATURAL SCENE IMAGES

Text detection and recognition is one of the difficult task in the computer vision, in particular in the case of images with a complicated background. The article is devoted to investigation of the task of text recognition in images with non-uniform background, in particular segmentation stage. The segmentation on lines, words and symbols are examined. The lines segmentation approach is based on determination of general intensity or color channels intensity and assumes definition of average intensity of the whole image, looking through every pixel line and definition its intensity, comparison line intensity with average intensity of image, finding of border between text and line spacing by intensity difference. The words segmentation approach is also based on determination of general intensity or intensity of color channels and consist of definition of text line general intensity, looking through every pixel column and definition its intensity, comparison with average text line intensity, finding the border between a word and space by intensity difference. The character segmentation based on finding maximally stable extremal regions (MSER) is suggested. The maximally stable external regions (MSER) feature detector works well for finding text regions because of the stable intensity profiles. This is a method for blob detection in images. The algorithm extracts from an image a number of co-variant regions: a region is a stable connected component of some gray-level sets of the image. The MSER extraction implements the following steps: sweep threshold of intensity from black to white, perform a simple luminance thresholding of the image; extract connected components (extremal regions); find a threshold when an extremal region is "maximally stable", i.e. local minimum of the relative growth of its square. The MSER detector marks out most of the text, it also detects many other stable regions in the images that are not text. These candidates are then filtered using regions geometric properties and stroke width information to exclude non-text objects. The segmentation process allows to extract characters for father classification and to create a dataset necessary for classifier training. The coding has implemented in python and qualitative analysis is performed.

Key words: optical character recognition, maximally stable extremal regions, symbol allocation, intensity

А.С. КАШТАЛЬЯН
Хмельницький національний університет

СЕГМЕНТАЦІЯ ТЕКСТОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ НА ЗОБРАЖЕННЯХ З ФОНОМ

Детектування та розпізнавання тексту є одним з складних завдань машинного навчання, зокрема це стосується зображень зі складним фоном. Стаття присвячена дослідженню питання розпізнавання тексту на зображення з неоднорідним фоном, зокрема етапу сегментації. Розглянуто сегментацію текстової інформації на рядки, слова та символи. Спосіб сегментації рядків ґрунтується на визначенні сумарної інтенсивності або інтенсивності каналів всього зображення та передбачає знаходження середньої інтенсивності всього зображення, проходження всіх піксельних рядків зображення та визначення їх інтенсивності, порівняння з сумарною інтенсивністю зображення, знаходження границі розділу рядку тексту та міжрядкового інтервалу за різницею інтенсивності. Спосіб сегментації слів також ґрунтується на визначенні сумарної інтенсивності або інтенсивності каналів і включає знаходження середньої інтенсивності текстового рядка, проходження всіх піксельних стовбців в рядку та визначення їх інтенсивності, порівняння з сумарною інтенсивністю рядка, знаходження границі розділу слова та проміжку між словами за різницею інтенсивності. Запропоновано сегментацію символів на основі знаходження максимально стабільних екстремальних регіонів (MSER). MSER детектор добре працює для знаходження текстових символів в умовах стабільності інтенсивності символьних зображень. Для виділення MSER областей виконуються наступні кроки: проходження порогу інтенсивності від чорного до білого; виконання простої порогової обробки інтенсивності зображення; виділення зв'язаних компонент (екстремальних регіонів); знаходження порогу, за якого екстремальний регіон буде максимально стабільним. MSER детектор достатньо добре позначає області тексту, але він також детектує багато інших стабільних областей на зображенні, які не є текстом. Регіони-кандидати потім фільтруються, використовуючи геометричні властивості та інформацію про ширину лінії для виключення нетекстових областей. Процес сегментації дозволяє виділити символи для подальшої їх класифікації, а також сформувати датасет, необхідний для навчання класифікатора. Експериментальні дослідження виконано з допомогою мови програмування python.

Ключові слова: оптичне розпізнавання тексту, максимально стабільні екстремальні регіони, виділення символів, інтенсивність.

Introduction

The amount of processed information constantly increases. Optical character recognition (OCR) is an important part of artificial intelligence application methods. Its applications are extremely wide; it is video processing, security activity, multimedia libraries, document flow, cartography, etc. An artificial imposed text or a natural text on video, images, documents are a source of important information. Nowadays the recognition of text can be used in even bigger number of application, including people navigation improving, supporting people with feeble sight, machine translation, because of the permanently increasing number of cameras, like smartphone cameras. The task of the recognition of text fragments on contrast images with uniform background is well investigated and successfully solved by now. However, the extraction of text information becomes a challenge in the presence of more complex background structure. Different factors begin to influence result, including text color, space text orientation, existence of similar to text elements.

The increase in indicators of accuracy of text allocation and segmentation in situations of difficult graphic scenes, which are characterized by a non-uniform background, a lack of precise criteria of difference between a background and the text, high probability of various distortions, is crucial for modern applications. The development of modern intellectual technologies of search of the text on video and images has to allow strengthening extent of

implementation of these technologies in different fields of activity farther.

Related Work

Major of works on text segmentation are focused on documents or on constrained contexts, like license plate detection and recognition. However, OCR area is in continuous development and it is possible to mark out several main directions.

One group consists of methods, which use contour information, because each symbol has clear expressed contour structure. Such approaches as skeletonization [1], edge detection and corner detection [2], invariant methods [3] and similar ones are used for text localization in this case. Fast data processing received at a preprocessing stage can represent an uncommon task in a case of images with a difficult background.

Another group of methods are based on color information processing, target areas usually have homogeneous color/intensity and satisfy restrictions on a form and size. The known approaches are histogram method [4], connected component analysis [5] and different algorithms of adaptive binarization including algorithms of Niblack, Sauvola, Chistian, Bernsan, Otsu [2]. Methods allow working with optional font size and optional text direction, but they do not work well enough on images with difficult background, noise and unsharpness, use the big number of heuristics.

One more group of methods is methods, which use textural information, text zones may significantly differ from a background, it allows to use various frequency filters for "images pyramid". The pattern recognition classical methods can be used for definition of target areas, among them support vector machines, neural networks, expert systems etc. [6]. In addition, special methods are used, for example the method of spectrographic structures [7]. These approaches allow processing images with complicated background; have high computing complexity because of necessarily of image scaling. The issue of textural features allocation is described in fundamental works like [8].

The known commercial decisions nevertheless do not give the possibility to receive necessary quality of speed of data processing. Existent methods are combined by the processing scheme: image quality improvement, segmentation for text areas identification, clustering and actually recognition. The algorithms presented in the open sources with use of neural networks and adaptive binarization provide high percent of text areas extraction. The lack of approach with use of neural networks is the high computing complexity, the necessarily of work with large sizes of the training sets and ambiguity at the choice of a neural network architecture. The methods, which use the shaped filters, show the same accuracy due to application of a support vectors approach for data processing.

Lines and Word Segmentation

Text recognition include next important parts: detect text areas in images, segment text areas to symbols, recognize symbols, gather words and sentences. Segmentation part may contain lines segmentation, words segmentation, symbols segmentation. These processes may be accurately separated or combined.

Lines segmentation. The task of line allocation comes down to finding of upper and lower lines sides of a text. Line segmentation is based on the fact that average brightness of lines spacing differs significantly from average brightness of text lines.

The average value of brightness of all pixel lines is

$$s_j = s_j(B) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} b_{ij},$$

n – the number of pixels in one line, b – brightness of a pixel.

The average value of brightness of whole image is

$$s(B) = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m} s_j(B),$$

m – the number of line in a image.

The brightness of an upper border of a text line can be expressed through average brightness of a whole image $s^t = k^t \cdot s(B)$, where $0 < k^t < 1$ - a coefficient.

The process of lines segmentation consists in consistent looking through a massive of average values $(s_1,\ldots,s_m)$ and identification of a set of indexes pairs $\left(s_i^t, s_i^b\right)$ of pixel lines corresponding upper s_i^t and lower s_i^b borders of the line with a number i. These pairs should satisfy conditions:

1. The condition of upper border of a text line. The beginning of a text line is defined if next conditions are satisfied: a brightness of a current pixel line differs from the border s^t; a brightness of two previous lines differs from this border; a brightness of next three lines differs from a border s^b.

2. The condition of lower border of a text line. The end of area of a steady change of brightness is defined if next conditions are satisfied: the beginning of area was fixed; a brightness of current pixel line differs from a border s^t; a brightness of next pixel line differs from a border s^b; or the beginning of area was fixed; a brightness of three next lines differs from a border s^b.

The set of pairs of upper and lower borders is computed in the described way. The difference between upper and lower indexes is a high of text lines. The found borders cut off overstepped symbols. It is necessary to expand the values of borders. The size of expansion depends on line spacing.

Words segmentation. The input for words segmentation is an image of one text line. This image can be obtained after lines segmentation in the case of multiline text or initial text. Firstly, it needs to perform two transformation of input image:

1. The threshold filter for contrast increasing

$$b_{ij} = \begin{cases} b_{\max}; & b_{ij} > b_0 \\ 0; & b_{ij} < b_0 \end{cases}$$

$i = 1 \ldots n$; $j = 1 \ldots m$; b_0 – brightness threshold.

2. Low-pass filtering.

The words segmentation algorithm is based on a fact that an average brightness in inter-word spaces significantly differs from a brightness inside words.

The average brightness of all pixel columns of initial line image is

$$c_i = c_i(B) = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^{m} b_{ij},$$

m – the high of current line in pixels.

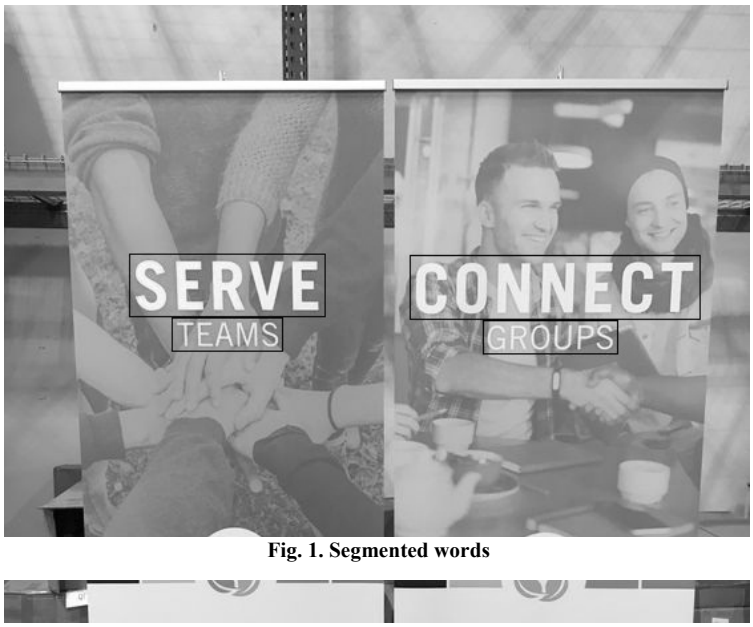


Fig. 1. Segmented words

The average brightness of the line image is

$$c(B) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} c_i(B),$$

n – the width of a current line in pixels.

The left border of a word (the beginning of a word) is expressed through an average brightness of a line image - $c^l = k^l * c(B)$, where $0 < k^l < 1$ - a coefficient.

The right border of a word (the end of a word) is also expressed through an average brightness of a line image - $c^r = k^r * c(B)$, $0 < k^r < 1$.

The algorithm assumes consistent looking through the set of average brightness values of pixel columns $(c_1 \ldots c_n)$ and finding the set of index pairs (c_i^l, c_i^r) of pixel lines corresponding a left c_i^l and a right c_i^r borders of word *i*. It should satisfy next conditions:

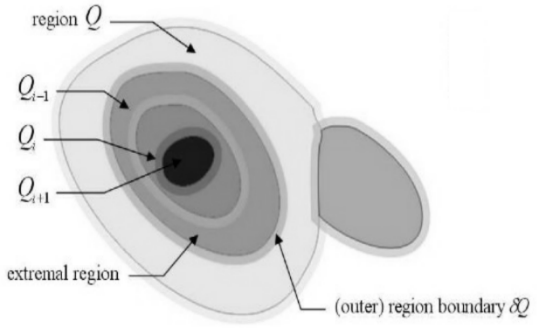
1. The conditions of a left bounder (the beginning of a word). The beginning of a word is considered when: a brightness of current and next pixel columns differ from a left border for a word c^l; a brightness of a previous pixel column differs from this border.
2. The conditions of a right bounder (the end of a word). The end of a word is defined if: the beginning of a word was fixed; a brightness of current and four next pixel columns is different from a brightness border c^r of an inter-word space; a brightness of two previous pixel columns differs from this border.

The example of result of lines and words segmentation is presented in the fig. 1.

Symbol Segmentation with Maximally Stable Extremal Regions

Image *I* is a mapping *I*: $D \subset Z^2 \to S$. Extremal regions are well defined on images if:

1. *S* is totally ordered, i.e. reflexive, antisymmetric and transitive binary relation $\leq$ exists. In this paper only $S = \{0,1,\ldots,255\}$ is considered, but external regions can be defined on e.g. real-valued images (*S*=*R*).
2. An adjacency (neighborhood) relation $A \subset D \times D$ defines. If 4-neighborhoods are used than $p, q \in D$ are adjacent (pAq) if $\sum_{i=1}^{d} |p_i - q_i| \leq 1$.



Region Q is a contiguous subset of *D*, i.e. for each $p, q \in Q$ there is a sequence

$p, a_1, a_2, \ldots, a_n, q$ and $pAa_1, a_i Aa_{i+1}, \ldots, a_n Aq$.

Region (outer) border $\partial Q = \{q \in D \setminus Q : \exists p \in Q : qAp\}$, i.e. the border ∂Q of Q is the set of pixels being adjacent to at least one pixel of Q but not belonging to Q (fig. 2).

Extremely region $Q \subset D$ is a region such that for every $p \in Q, q \in \partial Q$: $I(p) > I(q)$ (maximum intensity region) or $I(p) < I(q)$ (minimum intensity region) [8].

Fig. 2. Maximally Stable Extremal Regions

The maximally stable external regions (MSER) feature detector works well for finding text regions because of the stable intensity profiles. The algorithm of affine invariant intensity extremes implements in the following sequence: start from a local intensity extreme point; go in every direction until the point of extreme of some function *f*, the curve connection the points is the region boundary; compute geometric moments of orders up to 2 for this region; replace the region with a rectangle.

MSER is a method for blob detection in images. The MSER algorithm extracts from an image a number of co-variant regions: an MSER is a stable connected component of some gray-level sets of the image. MSER is based on the idea of taking regions that stay nearly the same through a wide range of thresholds:

- all the pixels below a given threshold are white and all those above or equal are black;
- if we are shown a sequence of threshold images I_t with frame corresponding to threshold *t*, we would see first a black image, then white spots corresponding to local intensity minima will appear then grow larger;
- these white spots will eventually merge, until the whole images is white;
- the set of all connected components in the sequence is the set of all extremely regions.

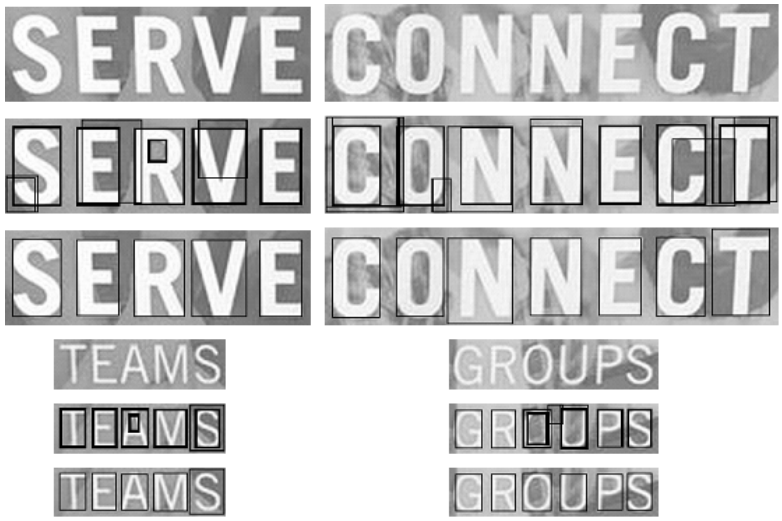


Fig. 3. Symbol segmentation by MSER detector and selection of the best regions-candidates

Optionally, elliptic frames are attached to the MSERs by fitting ellipses to the regions. Those regions descriptors are kept as features.

The word extremal refers to the property that all pixels inside the MSERs have either higher (bright external regions) or lower (dark external regions) intensity than all the pixels on its outer boundary. This operation can be performed by first sorting all pixels by gray value and then incrementally adding pixels to each connected component as the threshold is changed. The area is monitored. Regions such that their variation with the threshold is minimal are defined maximally stable.

The MSER extraction implements the following steps: sweep threshold of intensity from black to white, perform a simple luminance thresholding of the image; extract connected components (extremal regions); find a threshold when an extremal region is "maximally stable", i.e. local minimum of the relative growth of its square. Due to the discrete nature of the image, the region below/above may be coincident with the actual region, in which case the region is still deemed maximal; approximate a region with an ellipse (optional); keep those regions descriptors as features.

Fig. 4. Example of training sample symbols for machine learning classifier

In spite of the fact that MSER detector marks out most of the text, it also detects many other stable regions in the image that are not text. Firstly, geometric properties of text use to filter out non-text regions using simple rules. Several geometric properties are good for discriminating between text and non-text regions, including aspect ratio, eccentricity, Euler number, extent, solidity. It is also necessary to consider

separately the regions located inside other regions and remove repeating ones (fig. 3). In addition, machine-learning approach is used to train text vs non-text classifier as support vectors machine, neural networks etc. It is necessary to create the training set with text and non-text symbols for training a machine learning classifier (fig. 4). A combination of the two approaches produces better results. The next task is the classification of detected symbols. Experiments were conducted with python language.

Conclusion

In this work, a general methodology for text lines, words and characters segmentation in natural scene images is presented. Compare to others this approach is general and can be applied to wide range of images independently from background non-uniformity. The properties of difference intensity and MSER detection were be combined. Intensity difference was used for lines and words segmentation, because they generally have similar features. MSER blob detection was used for characters' detection. The combination of these methods give high quantity of text detection in images with background. The exact number of detection accuracy depends on the quality of input images. The number of detected symbols can be increased due to image preprocessing.

References

1. Pogodin S.V. Allocation and the analysis of skeletons of objects in color pictures / S.V. Pogodin // Software products and systems. – Russia, Tver, 2009. – Volume 2. – P. 42–45.

2. Shapiro L. Computer vision / Shapiro L., Stokman J. – Russia, Moscow, Binom, 2006 – 752 p.

3. Aviles C.C. A robust font recognition using invariant moments / C.C. Aviles, C.J. Villegas, H.J. Ocampo // Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Applied Computer Science – China, Hangzhou, 2006. – P. 114–117.

4. Vinogradov A.N. Extraction and recognition of local objects in space pictures / A.N. Vinogradov, F.V. Kalugin, M.D. Nedev // Aerospace instrument making. – Russia, Moscow, 2007. – Volume 9. – P. 39–45.

5. Feby Ashraf. Connected component clustering based text detection with structure based partition and grouping / Feby Ashraf, V. A. Nurjahan // Journal of Computer Engineering, 2014. – Volume 16, Issue 5. – P. 50–56.

6. Talalaev A.A. Allocation and clustering of text and graphic elements in semitone pictures / A.A. Talalaev, I.P. Tyshchenko, M.V. Hachumov // Artificial intelligence and decision making. – Russia, Moscow, 2008. – Volume 3. – P. 72–84.

7. Fralenko V.P. The analysis of spectrographic textures of Earth remote sensing data / V.P. Fralenko // Artificial intelligence and decision-making. – Russia, Moscow, 2010. – Volume 2. – P. 11–15.

8. Matas J. Robust wide baseline stereo from maximally stable extremal regions / J. Matas, O. Chum, M. Urban, and T. Pajdla // Proc. of British Machine Vision Conference, 2002. – P. 384–396.

Рецензія/Peer review : 13.11.2017 р. Надрукована/Printed :05.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Полікаровських О.І.

УДК 623.519

О.С. ПИВОВАР
Хмельницький національний університет

ВАРІАНТ СТРУКТУРНОЇ БУДОВИ ШИРОКОСМУГОВОЇ АНАЛОГОВОЇ СИСТЕМИ ПРИХОВАНОГО ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ СИГНАЛІВ ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ

Розглянута можливість застосування сигналів детермінованого хаосу в якості підносівних для подальшого використання у надширокосмугових системах аналогового прихованого зв'язку. Запропоновано варіант структурної будови системи прихованого зв'язку придатної для практичної реалізації.

Ключові слова: нелінійна динамічна система, детермінований хаос, хаотична синхронізація, система прихованого зв'язку.

O. PYVOVAR
Khmelnytsky National University

A VARIANT OF STRUCTURAL ORGANIZATION OF AN ANALOG SYSTEM IN SECRET BROADBAND BASED ON THE USE OF DETERMINISTIC CHAOS SIGNALS

The use of nonlinear models for a more adequate description and understanding of reality has led to the discovery of a new class of signals - a deterministic chaos. Characteristics of the form and spectrum of deterministic chaos signals have become extremely suitable for use in secret broadband communication systems. The possibility of chaotic synchronization of the receiving and transmitting part of the transmission system as well as the discovery of the phenomenon of chaotic synchronous response allowed proceeding to the practical implementation of the systems. The majority of the proposed variants of implementation of secret communication systems based on deterministic chaos signals are based on the use of digital signals as informational in direct-chaotic information transmission systems. This research includes the classification of well-known ways of processing signals of deterministic chaos in the aspects of broadband, modulation, and synchronization. The advantages, disadvantages, peculiarities and limitations of using these processes are indicated in terms of practical application in complex circuit design solutions for the construction of high security communication channels which are protected from unauthorized access. In such channels, firstly encryption is carried out by selecting the generator type and its initial parameters of development. Secondly, the high degree of variation in the configuration parameters of the generators of deterministic chaos signals allows obtaining a large number of encryption keys. Thirdly, the result of encryption is purely noise-like, which provides a high degree of security. It is proposed to regard an informational and chaotic signal as ones with approximately the same frequency resource. The introduction of an informational signal into a signal of a deterministic chaos is being implemented by the means of the previous use of one-band modulation without suppression or with partial suppression of carrier frequency. In the case of a single-sideband modulation, it is advisable to remove the upper sideband, and the carrier frequency must be located in the upper part of the spectrum area of the chaotic signal which not occupied by the spectral components. Additional classical modulation improves the practical implementation of uniting the synchronization channel and the informational channel in one physical communication line, as well as allows them to be separated by means of the phenomenon of chaotic synchronous response provided certain correlations of the amplitudes. In accordance with the proposed principle, a structural scheme for the practical implementation of the system was developed based on the use of chaotic synchronous response phenomenon, and the requirements for the construction of the structural elements of the circuit and the communication channel are specified.

Key words: nonlinear dynamical system, deterministic chaos, chaotic synchronization, system of secret communication.

Постановка проблеми

На межі останніх століть увагу фахівців все більше і більше пригортають явища, що виникають в нелінійних динамічних системах (НДС), моделі яких краще відображають дійсність за широковідомі квазілінійні та лінійні класичні моделі реальних процесів. Одним із таких явищ є поява у замкненій НДС хаотичної поведінки. Сигнали, що описують динаміку розвиту НДС із хаотичною поведінкою суттєво відрізняються як від детермінованих так і від стохастичних. За подібними сигналами закріпився термін – детермінований хаос (ДХ), що відображає як наявність детермінованої природи так і деякі риси випадкових процесів, в першу чергу неперіодичність. Більш того, класичні детерміновані сигнали можливо вважати частинним випадком сигналів детермінованого хаосу для певного режиму роботи НДС.

Якщо в минулому явище детермінованого хаосу досліджувалось на основі математичного аналізу НДС, то на даний час створено ряд схем генераторів, що підлягають простій практичній реалізації. На основі їх застосування дослідження НДС перейшли у практичну зону не тільки у радіотехнічній галузі, але й в медицині, біології, механіці, теплотехніці а також в гуманітарних дисциплінах, таких як соціологія, філософія, історія. Це пов'язано із загальними рисами хаотичних процесів що виникають у природі: наявності нелінійності, циклічності, динаміки прогресу та певних параметрів первинного налаштування. Моделі подібних НДС виявляються більш складними за класичні, часто процес дослідження хаотичної поведінки вимагає надзвичайно потужних обчислювальних засобів, що з'явилися в останні 20–30 років, але, вбираючи в себе властивості як детермінованих так і стохастичних сигналів, сигнали детермінованого хаосу теоретично дозволяють забезпечити кращі тактичні характеристики багатьох радіосистем добування та передачі інформації, що є і залишається актуальним на будь-якому етапі розвитку суспільства.

Метою статті є обґрунтування доцільності використання сигналів детермінованого хаосу та способів їх обробки у широкосмугових системах аналогового прихованого зв'язку із високою криптографічною стійкістю та розробка проттипної структурної побудови таких систем на основі застосування явища хаотичного синхронного відгуку.

Аналіз останніх джерел

Із практичної точки зору для побудови систем передавання інформації важливі наступні риси сигналів детермінованого хаосу [1]:

- варіативність, можливість отримання різноманітних сигналів в одному генераторі невеликою зміною його параметрів (висока криптографічна стійкість);
- широкосмуговість, що призводить до великої інформаційної ємності (висока пропускна спроможність каналів);
- неперервність спектру, що обумовлює високі автокореляційні та взаємно кореляційні властивості (завадостійкість, багатоканальність);
- відтворюваність, що означає можливість генерації однакових сигналів на приймальному та передавальному боці;
- можливість повної та часткової синхронізації джерел хаотичного сигналу на основі явища хаотичного синхронного відгуку.

Важливо відмітити, що ці риси сигналів проявляються комплексно, що дозволяє реалізувати такі функції як забезпечення високої пропускної спроможності, захисту від несанкціонованого доступу, багатоканальності тощо, одночасно використовуючи мінімум апаратних витрат [2], що в існуючих системах реалізується послідовно на різних рівнях протоколу обміну (різні функціональні модулі). Але «розплатою» за цей ряд позитивних рис сигналів ДХ є надзвичайно високі вимоги до стабільності та точності виготовлення елементів каналу передачі.

Позитивні якості сигналу ДХ дозволяють застосувати його, в першу чергу, як носівне коливання (рис. 1) у широкосмугових та особливо у надширокосмугових системах, в яких як опорні зазвичай використовуються сигнали, або сигнально-кодові конструкції на основі гармонічних та імпульсних коливань. В першу чергу це відноситься до побудови прямохаотичних систем із цифровою передачею сигналу. Застосування гармонічних сигналів для вказаної мети вимагає використання процедури розширення спектру і найбільш поширеними подібними процедурами є глибока частотна (фазова) модуляція (CSS), пряме розширення спектру (DSSS) та стрибки по частоті (FHSS). Спектр носівних імпульсних сигналів набагато ширше за спектр модульованих гармонічних сигналів, тому у радіосистемах останніх поколінь (4G) використовують комбінацію опорних гармонічного та імпульсного сигналів на різних частотах, граничним випадком якої є сигнали з ортогонально-частотним мультиплексуванням (OFDM). Слід зважити на те, що у системах з OFDM також наявна тенденція комплексного використання функцій багатоканальності, широкосмуговості, квазіхаотичності тощо. В рамках застосування сигналів ДХ як підносівних, до двох класичних опорних підносівних доцільно додати і хаотичні (рис. 1). Останні, так само як і гармонічні та імпульсні коливання, можуть виступати як носівні коливання самостійно, так і в комбінації з класичними сигналами із метою побудови сигнальних конструкцій. Та зважаючи на особливі умови практичної реалізації хаотичних аналогових систем зв'язку [3] для реального втілення найбільш придатна сигнальна конструкція на основі комбінації хаотичного і гармонічного сигналу.

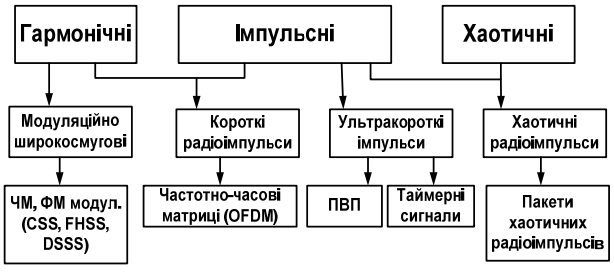


Рис. 1. Класифікація опорних носівних сигналів з точки зору забезпечення широкосмуговості

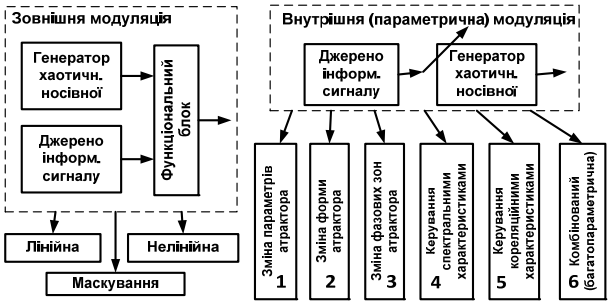


Рис. 2. Класифікація методів введення інформаційного сигналу в хаотичну підносівну

Для цифрових систем передачі, що переважно застосовуються як прототипи систем із застосуванням ДХ, доцільна комбінація сигналів ДХ із імпульсними опорними підносівними (рис. 1) що утворюють сигнальні конструкції із хаотичних імпульсів, або пакетів хаотичних імпульсів. Обвідна спектру потужностей такої комбінації сигналів визначається вихідним спектром неперервного сигналу детермінованого хаосу і, під час виконання певних умов практично не залежить від довжини імпульсів.

Такі параметри сигналів як ширина спектру, база сигналу, і навіть положення центральної частоти може змінюватись в широких межах, залежно від налаштування параметрів та певного режиму генераторів детермінованого хаосу. Як показали дослідження [2], потужність ансамблю канальних підносівних на основі таких комбінацій перевищує потужності таких широко застосовуваних сигналів як М-послідовності, що говорить про збільшену кількість ключів шифрування систем із сигналами ДХ.

Тому на даному етапі концепція побудови систем передачі із хаотичними сигналами носить змішаний характер де використовуються як класичні, так і хаотичні сигнали. Хоча тенденція використання суто нелінійних ефектів [4] залишається, це підтверджується розробкою у провідних країнах світу квантових системи передачі, що також вимагають особливо точних та стабільних умов дотримання заданого

квантового стану активного середовища.

Виклад основного матеріалу

Під час формування структури аналогового хаотичного каналу для практичного втілення окремо слід звернути увагу на спосіб введення (рис.2) інформаційного сигналу у хаотичну підносівну за умови, що опорний хаотичний генератор за допомогою встановлення початкових умов та внутрішніх параметрів працює в широкосмуговому режимі утворення складного сигналу ДХ із великою базою. За таких умов застосування поняття «спосіб введення інформаційного сигналу» замість «модуляція» підкреслює той факт, що таке поняття охоплює більш широку зону процесів обробки сигналів, хоча більш загальновживаним є поняття «хаотична модуляція».

У складі хаотичного модулятора може застосовуватись один або декілька генераторів хаотичних сигналів (ГХС). Багатогенераторне технічне рішення спряжено із необхідністю утворення багатьох каналів хаотичної синхронізації, що надто складно та коштовно реалізовувати в межах окремої аналогової лінії зв'язку, тому найбільш придатним є одногенераторна схема вводу інформаційного сигналу в хаотичний, способи реалізації якої запропоновано поділити на зовнішні та внутрішні та їх варіації (рис. 1).

Зовнішня модуляція не змінює структури ГХС, та реалізується у зовнішньому функціональному пристрої, який може бути як лінійним, так і нелінійним, зрозуміло, що під час демодуляції має відбуватись зворотна функціональна операція. У випадку застосування суматора як функціонального елементу процес введення інформаційного повідомлення в хаотичний сигнал називають хаотичним маскуванням (ХМ), де спектри інформаційного повідомлення та сигналу ДХ повністю перекриваються та, за умови певного співвідношення амплітуд, спектральні складові інформаційного сигналу «розчиняються» у спектрі сигналу ДХ що і забезпечує реалізацію каналу прихованого зв'язку.

Усі способи зовнішньої модуляції мають більшу швидкодію за рахунок відсутності перехідних процесів, пов'язаних із переведенням хаотичних траєкторій в іншу зону фазового простору та детектування такого переходу на приймальному кінці, що фактично відбувається у хаотичних модуляторах із внутрішньою модуляцією. Недоліком хаотичного маскування є необхідність забезпечення високого рівня якості хаотичної синхронізації, коли ведений ГХС відтворює опорний сигнал ведучого ГХС, навіть, якщо він «спотворений» хаотичним маскуванням.

Властивість детермінованості хаотичних сигналів вказує на можливість синхронізації двох (або більше) ГХС. Експериментальна можливість еволюції двох різних генераторів хаосу по одним траєкторіям обумовила створення реальних систем із сигналами ДХ як наступний крок розвитку телекомунікаційних систем [3]. Для забезпечення синхронізації між ГХС слід утворити однобічний або двобічний зв'язок із певним рівнем впливу (перекачування енергії). Односпрямований (рис.4) зв'язок більш «передбачуваний» у сенсі встановлення стабільного хаотичного режиму, але потребує застосування невзаємних елементів наскрізного тракту передачі, що розділяють ГХС на ведучий та ведений, при цьому рівень зв'язку підбирається для кожного типу ГХС окремо.

Найбільш теоретично та практично досліджена узагальнена односпрямована синхронізація [4], що передбачає детерміновану функціональну залежність між векторами станів ведучого та веденого генераторів. Іноді функціональна залежність виявляється достатньо складною, але у найпростішому випадку ці стани співпадають асимптотично та відповідають повній синхронізації, де функція зв'язку перетворюється у тотожність а похибка розсинхронізації прямує до нуля. Для ідентифікації режиму узагальненої синхронізації використовуються наступні методи: метод найменшої взаємної помилки суміжних траєкторій; метод визначення умовних показників Ляпунова, метод додаткової допоміжної системи тощо.

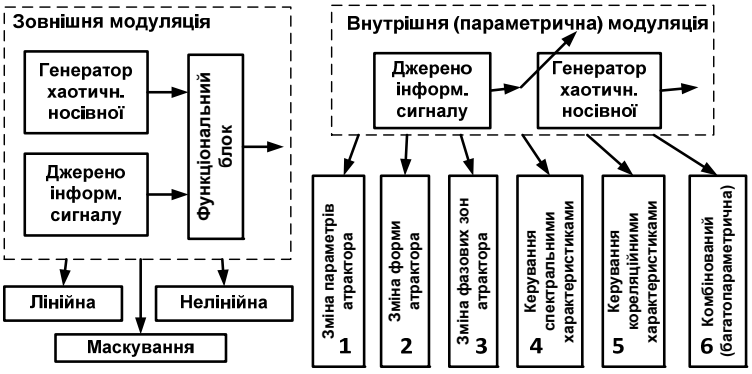


Рис. 3. Класифікація способів одногенераторної хаотичної модуляції

Неповна синхронізація забезпечує наближену відповідність вектору станів ведучої та веденої системи із ненульовою точністю, що в системах зв'язку призводить до погіршення ТТХ. Повна синхронізація проявляється практично в усіх типах генераторів хаосу [3]. Неповна та гранична (рис. 4) синхронізація була знайдена лише у окремих ГХС та й до того ж часто характеризується флуктуючою часовою затримкою, що неприпустимо у телекомунікаційних системах. Завдяки наявності інерційних елементів у складі ГХС хаотична синхронізація може бути не тільки неперервною, але і імпульсною, із

збільшенням шпаруватості імпульсів режим повної синхронізації все більше нагадує режим неповної синхронізації.

Цікаво відмітити, що під час хаотичної синхронізації можливо реалізувати певний тип функціональної обробки: помноження на -1(повна інверсна синхронізація); затримка і навіть випередження (!) сигналу (лаг-синхронізація), підсилення (гранична), часове стискання (синхронізація часового масштабування), що є основними функціональними блоками будь-якої радіотехнічної системи, що наштовхує на думку про розгляд обробки сигналів з точки зору елементів теорії хаосу тощо.

Особливою відмінністю у системах на основі детермінованого хаосу є можливість передачі інформаційного повідомлення та сигналу синхронізації одночасно в одному каналі зв'язку із високим рівнем захисту від несанкціонованого доступу за умови використання ГХС на обох боках лінії передачі із високим ступенем ідентичності, а також дотримання певних співвідношень між рівнями сигналів. Саме така особливість хаотичної синхронізації на основі хаотичного синхронного відгуку [4] обумовлює можливість побудови аналогової хаотичної системи передачі прихованого зв'язку, де хаотичний сигнал використовується як маскуючий, а канал синхронізації об'єднаний із каналом передачі даних.

Завдяки необхідності дотримання певного співвідношення амплітуд інформаційного та маскуючого сигналу безпосереднє введення аналогового сигналу в сигнал ДХ є проблематичним. Тому слід застосувати допоміжний детермінований сигнал, яким може виступати гармонічний або полігармоничний сигнал, що утворює сигнальну конструкцію із хаотичним. Для ефективного маскування амплітуда та частота гармонічного сигналу мають бути оптимальними. Найбільш доцільно «приховати» гармонічну складову у спектрі хаотичного сигналу використовуючи той факт, що сигнали детермінованого хаосу багатьох генераторів мають вузькі ділянки спектру не завантажені спектральними складовими. Положення цих ділянок визначається параметрами налаштування генератора, що виступають як ключі шифрування. За умови попадання туди частоти допоміжного гармонічного коливання із певною амплітудою десинхронізація хаотичних генераторів не відбувається [3].

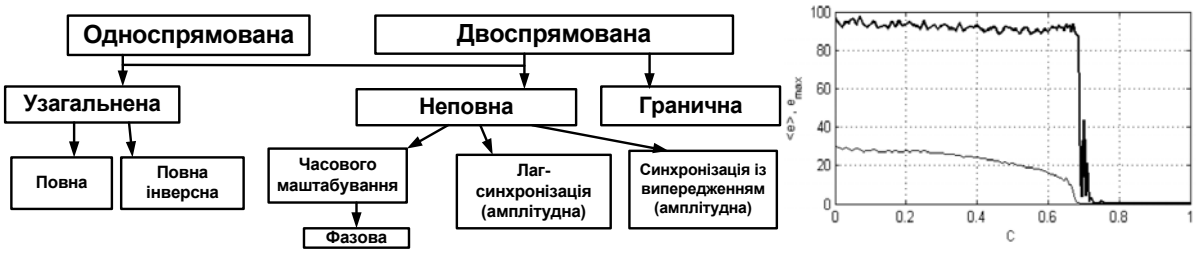


Рис. 4. Методи хаотичної синхронізації (ліворуч) та залежність похибки повної синхронізації від рівня односпрямованого зв'язку

Математичним моделюванням показано, що для генератора Чуа, що формує сигнал детермінованого хаосу у зоні звукових частот, найбільш оптимальним є використання частот допоміжного сигналу, що розташовуються у верхній частині спектру із амплітудою, що не перевищує 20% амплітуди хаотичного сигналу. Таким чином, спираючись на проведений вище аналіз можливо запропонувати повну структурну схему широкосмугової хаотичної системи прихованого зв'язку придатну для практичної реалізації.

Схема складається із групи приймальних та передавальних блоків, функціональне призначення яких широковідоме. Приймач та передавач взаємодіють через односпрямовану лінію передачі, тобто зв'язок в даному випадку носить симплексний характер. Двоспрямований зв'язок може бути реалізовано утворенням двох каналів симплексного зв'язку, при цьому шифрування зв'язку в обох напрямках проходить окремо та рівень прихованості дії системи загалом покращується.

Передавальна частина схеми (рис. 5) складається із ряду невзаємних блоків, тобто таких, в яких передача сигналу носить односпрямований характер, що є принциповим для побудови системи. Інформаційний сигнал генерується в джерелі аналогової інформації, наприклад, звичайне телефонне повідомлення. При цьому, слід зважити не те, що ширина спектру аналогового сигналу має узгоджуватись із шириною спектру сигналу детермінованого хаосу. Наприклад, у випадку генератора Чуа виконаного на інтегральній аналоговій елементній базі ширина спектрів може становити десятки мегагерц, а у випадку використання хаотичних генераторів Колпіца і набагато вище. Вказаний рівень широкосмуговості забезпечує пропускну здатність на рівні десятків мегабод, що цілком достатньо, наприклад, для передачі аналогового телевізійного повідомлення високої якості.

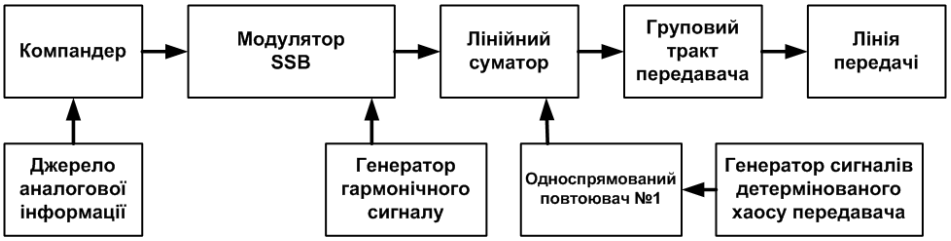


Рис. 5. Структурна схема передавальної частини системи прихованого зв'язку

Завдяки оптимальним умовам, що визначають амплітуду допоміжного сигналу, інформаційний сигнал має підлягати процедурі стиснення динамічного діапазону у компандері (рис. 5). Наявність обмеження динамічного діапазону забезпечує дотримання режиму повної хаотичної синхронізації в системі із одночасною можливістю відокремлення інформаційного сигналу від суміші простими апаратними засобами.

Генератор гармонічного сигналу фактично являє собою синтезатор, параметри якого мають відповідати обраному хаотичному режиму із дотриманням вимог оптимальності генерованої частоти та амплітуди. Якщо частота допоміжного гармонічного сигналу має встановлюватись ближче до верхньої частоти широкосмугового діапазону генератора детермінованого хаосу то для отримання аналогової модуляції більше підходить варіант модуляції із нижньою боковою смугою (SSB) із повним або частковим залишком підносівного коливання. Отже, структура сигналу на виході модулятора є квазігармонічною, та його маскування у лінійному суматорі проходитиме аналогічно використанню гармонічного сигналу. Використання нелінійних різновидів модуляції підносівної створює сигнали далекі від квазігармонічного, тому в такій структурі прихованого зв'язку недоцільне, крім того, використання додаткової нелінійності під час обробки в каналі передачі із сигналами ДХ непередбачуване за наслідками та потребує більш ретельного вивчення.

Криптографічна стійкість такої системи прихованого зв'язку визначається типом та структурою генератора сигналів детермінованого хаосу, початковими умовами збудження, номінальними значеннями елементів, що входять до складу схеми генератора, розташуванням частоти та амплітуди підносівного коливання, типом схеми модуляції тощо. Крім того, під час односмугової модуляції із нижньою боковою смугою реалізується інверсія спектру, що під час передачі таким каналом прихованого зв'язку телефонних повідомлень є додатковим фактором забезпечення прихованості дії. Різноманітність факторів, що визначають ключ шифрування в такій системи забезпечує надзвичайно велику кількість ключів, а отже і високий рівень прихованості дії. Застосування односпрямованого повторювача (рис. 5) дозволяє провести ізоляцію чутливого до зовнішнього впливу ГХС від зовнішніх факторів та інформаційного повідомлення.

Лінійна суміш квазігармонічного та хаотичного сигналів надходить у лінійний груповий тракт передавача (рис. 5). За попередніми оцінками групові приймача та передавача разом із лінією передачі мають мати коефіцієнт нелінійних спотворень менше 0,1% та динамічний діапазон більш як 60 дБ. Також широкосмуговий груповий тракт має мати рівномірну АЧХ та лінійну ФЧХ і забезпечувати компенсацію втрат під час передачі підсиленням. Вимоги до групових трактів хаотичних систем є достатньо жорсткими, але це одночасно може виступати і позитивним фактором, забезпечуючи чутливість до спроб несанкціонованого підключення до лінії передачі та прослуховування каналу. У рамках поставленого завдання перспективним є використання оптичних ліній зв'язку із диференційною обробкою сигналів.

Приймальна частина (рис. 6) структурно виглядає дещо складніше за передавальну в першу чергу за рахунок наявності тракту синхронізації та тракту демаскування односмугового сигналу. На виході широкосмугового групового тракту приймача сигнал, достатньої для подальшої обробки потужності, спрямовується на блок розгалуження, що складається із односпрямованих ідентичних повторювачів. Односпрямовані елементи повторювачів блокують взаємний вплив тракту демодуляції додаткової підносівної та тракту синхронізації. Отже, на виході односпрямованих підсилювачів № 2 та № 3 діють ідентичні сигнали, «ізольовані» один від одного.

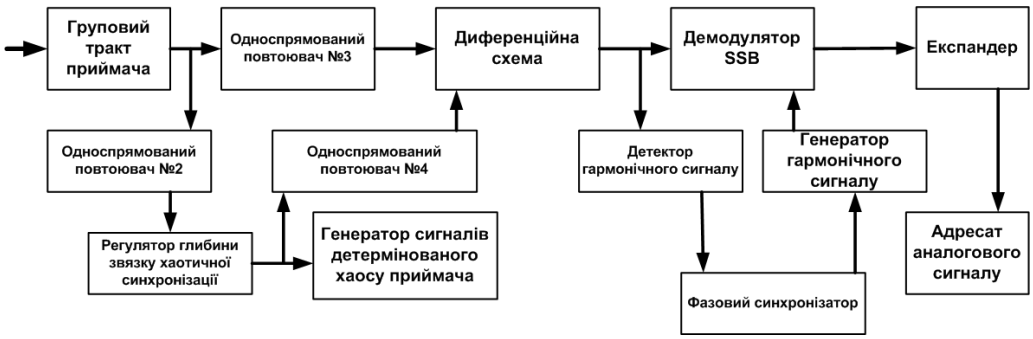


Рис. 6. Структурна схема передавальної частини системи прихованого зв'язку

Регулятором глибини зв'язку хаотичної синхронізації встановлюється закритичний рівень (див. рис. 4) синхронізуючого коливання який «нав'язує» генератору сигналів детермінованого хаосу приймача еволюцію генератора сигналів детермінованого хаосу передавача реалізуючи ефект нелінійного синхронного відгуку [4]. В результаті цього, на виході ГХС приймача встановлюється форма сигналу, яка відповідає формі сигналу на виході ведучого ГХС, тобто усувається вплив квазігармонічного коливання за рахунок повної синхронізації.

Для запобігання впливу з боку тракту демодуляції хаотичний генератор приймача «відгорожено» від диференційної схеми демаскування односпрямованим повторювачем №4. Таким чином у тракті синхронізації, на основі явища нелінійного хаотичного синхронного відгуку реалізується усування сторонніх, штучно нав'язаних лінійних змін сигналу детермінованого хаосу через ідентичність параметрів ведучого та веденого хаотичних генераторів на приймальному та передавальному боці системи. Це дає можливість на основі симетричної диференційної схеми реалізувати віднімання «чистого» хаотичного сигналу від суміші хаотичного та квазігармонічного сигналу, тобто фактично здійснити демаскування інформаційного повідомлення, що неможливо здійснити в класичних системах зв'язку. Зрозуміло, що процес демаскування спряжений із появою апаратних похибок, які не мають перевищувати певного рівня із умови дотримання закритичного рівня під час повної хаотичної синхронізації. Тобто, високий рівень прихованості дії вимагає високої якості апаратної та технологічної реалізації системи в цілому. Але подібні вимоги на даному етапі розвитку техніки зв'язку не є недосяжними.

Надалі обробка в приймачі проходить добре відомим класичним шляхом демодуляції односмугового сигналу за умови якісного демаскування. Відновлення носівної може бути проведено за допомогою синхронного резонансного фільтра або схеми на основі ФАПЧ, а демодулятор SSB та процес експандування відновлюють широкосмугове аналогове інформаційне повідомлення.

Висновки

1. Розглянуто основні варіанти побудови окремих елементів структурної побудови аналогового каналу хаотичного зв'язку в аспектах хаотичної синхронізації, хаотичної модуляції та методів забезпечення широкосмуговості із метою побудови широкосмугової системи із високим ступенем криптографічного захисту.

2. Встановлено, що для практичної реалізації широкосмугового аналогового прихованого каналу зв'язку на основі генераторів детермінованого хаосу найбільш доцільно використовувати процес маскування аналогового повідомлення хаотичним сигналом із подальшим виділенням його на основі явища нелінійного синхронного відгуку під час повної односпрямованої синхронізації ведучого та веденого генератора сигналів детермінованого хаосу .

3. Розроблено структурну схему практичної реалізації системи на основі використання хаотичного маскування із допоміжним гармонічним сигналом, вказано вимоги до побудови структурних елементів схеми та каналу зв'язку.

Література

1. 1.Дмитриев А.С. Динамический хаос. Новые носители информации для систем связи / А.С. Дмитриев, А.И. Панас. – М. : Изд-во Физматлит, 2002. – 252 с.

2. Бельський Ю.Л. Передача информации с помощью детерминированого хаоса / Ю.Л. Бельський, А.С. Дмитриев // Радиотехника и электроника. – 1993. – Т. 38, № 7. – С. 13100–1315.

3. 3.Короновский А.А. О применении хаотической синхронизации для скрытой передачи информации / А.А. Короновский, О.И. Москаленко, А.Е. Храмов // Успехи физических наук. – 2009. – Т. 179. – № 12. – С. 1281–1310.

4. 4.Політанський Л. Система передачі інформації з використанням синхронного хаотичного відгуку / Л. Політанський, М. Кушнір, С. Галюк // Комп'ютерні науки та інженерія : матеріали III міжн. конф. молодих вчених CSE-2009, 14–16 травня 2009 р. – 2009. – С. 319–320.

References

1. Dmytryev A.S. Dynamycheskyi khaos. Novыe nosytely ynformatsyy dlia system sviazy / A.S. Dmytryev, A.Y. Panas. – M.: Yzd-vo Fyzmatlyt, 2002. – 252 S.

2. Belskyi Yu.L., Dmytryev A.S. Peredacha ynformatsyy s pomoshchiu determynyrovanoho khaosa // Radyotekhnyka y эlektronyka. – 1993. – T. 38, 7. – C. 13100–1315.

3. Koronovskyi A.A. O prymenenyy khaotycheskoi synkhronyzatsyy dlia skrыtoi peredachy ynformatsyy / A.A. Koronovskyi, O.Y. Moskalenko, A.E. Khramov // Uspekhy fyzycheskykh nauk. – 2009. – T. 179. – 12. – S. 1281–1310.

4. Politanskyi L. Systema peredachi informatsii z vykorystanniam synkhronnoho khaotychnoho vidhuku / L. Politanskyi, M. Kushnir, S. Haliuk // Kompiuterni nauky ta inzheneriia : materialy III mizhn. konf. molodykh vchenykh CSE-2009, 14–16 travnia 2009 r. – 2009. – S. 319–320.

Рецензія/Peer review : 22.11.2017 р. Надрукована/Printed :19.11.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Полікаровських О.І.

УДК 621.397

В.І. СТЕЦЮК, О.С. РАВЧУК
Хмельницький національний університет

ТЕНДЕНЦІЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ КВАРЦОВИХ РЕЗОНАТОРІВ

В статті піднімається проблема пошуку методів підвищення стабільності кварцових резонаторів. Розглянуто ансамбль дестабілізуючих факторів, серед яких окреслено круг основних та здійснена їх класифікація. Виявлено, що основними дестабілізуючими факторами є температура та вібрація, що впливає на динамічні характеристики та стабільність п'єзорезонансних пристроїв. Методи покращання температурних характеристик кварцових резонаторів в основному базуються на способах компенсації дії температурних впливів та забезпечення термостатування конструкцій генераторів. Методи покращання віброчастотних характеристик кварцових резонаторів розділено на конструктивно-технологічні, функціональні та комбіновані. Розглянуто конкретні методи, направлені на покращення віброчастотних характеристик кварцових резонаторів. В роботі також наведено ієрархію джерел стабільних коливань. Окреслено основні напрямки удосконалення джерел формування стабільних коливань. Для компенсації температурних та вібраційних впливів запропонований багаточастотний метод отримання інформації з кількох різних збуджених мод кварцового резонатора, завдяки їх різницевій частоті. Це найбільш перспективний метод, який дозволяє розв'язати поставлені задачі щодо мінімізації впливу ансамблю дестабілізуючих факторів.

Ключові слова: п'єзорезонансний пристрій, кварцовий резонатор, датчик, частота, дестабілізуючі фактори, температура, вібрація, стабільність, термостатування, компенсація.

V.I. STETSYUK, O.S. RAVCHUK
Khmelnytsky National University

TRENDS OF INCREASE METHODS OF STABILITY OF QUARTZ RESONATORS

The article raises the problem of finding methods for increasing the stability of quartz resonators. The ensemble of destabilizing factors is considered, among which the circle of the basic ones is outlined and their classification is carried out. It is revealed that the main destabilizing factors are temperature and vibration, which affects the dynamic characteristics and stability of piezoresonance devices. In addition, the influence of external factors is not unambiguous, for example, the temperature dependence of the resonant frequency has a hysteresis. Moreover, if in relation to the temperature itself, the quartz resonator has a certain inertia, that is, the property of linear averaging of rapidly changing thermal processes, then in relation to the vibration, the effect of this effect is negligible. Methods for improving the temperature characteristics of quartz resonators are mainly based on methods of compensating for the effects of temperature influences and providing thermostat for generator designs. They are divided into passive (without the use of additional heat sources) and active (with the use of additional heat sources). dynamic characteristics of piezo-resonance devices. It is established that in conditions of microminiaturization of quartz resonators the most promising for identifying the thermal state is the use of multi-frequency modes of excitation. Methods for improving the vibration frequency characteristics of quartz resonators are divided into structural, technical, functional and combined. The disadvantages of all mechanical methods for reducing the effects of vibrations are large dimensions of damping devices, their various damping properties over spatial coordinates, insufficient inhibition of vibrations in the low-frequency region (up to 100-300 Hz), and the spatial distribution of a vibration sensor with an active zone of a quartz resonator, which leads to errors between measurable and actually active magnitude of vibrodynamic effect. Specific methods aimed at improving the vibration frequency characteristics of quartz resonators are considered. The paper also presents a hierarchy of sources of stable oscillations. The main directions of improvement of sources of formation of stable oscillations are outlined. To compensate for temperature and vibrational effects, a multi-frequency method for obtaining information from several different excited modes of a quartz resonator is proposed, due to their difference frequency. This is the most promising method that allows solving the problems of minimizing the influence of the ensemble of destabilizing factors.

Keywords: piezoresonance device, quartz resonator, sensor, frequency, destabilizing factors, temperature, vibration, stability, thermostat, compensation.

Вступ

П'єзорезонансні пристрої (ПРП) та кварцові резонатори (КР) зокрема являються невід'ємною складовою будь-якого радіоелектронного пристрою чи системи. Потреба в КР постійно зростає за рахунок розширення області їх застосування, високих метрологічних характеристик, рентабельності їх серійного виробництва, а також високих параметрів якості та ефективності роботи. Це зумовлено тим, що кварц, як матеріал для виробництва, являється одним із найпоширеніших і найдешевших мінералів у земній корі. Окрім того, сьогодні широко застосовуються різноманітні методи синтезу штучного кварцу із рядом заданих параметрів і характеристик та підвищеною хімічною чистотою. Кварцові резонатори широко застосовуються у комп'ютерній техніці, телекомунікаційних засобах, пристроях радіолокації та навігації, у контрольно-вимірювальній апаратурі, в промислових радіотехнічних комплексах, та багато ін. Роль кварцових резонаторів постійно зростає, розширюється їх номенклатура, сфери застосування. Це накладає нові вимоги до конструкцій і параметрів КР, спонукає до пошуку нових шляхів та підходів у вдосконаленні даного класу радіоелементів. Проте, дія великої кількості дестабілізуючих факторів значно обмежує метрологічні характеристики КР. Нестабільність частоти генерованих коливань на основі кварцової стабілізації залежить від змін температури, вологості, тиску, механічних впливів, радіації, коливань напруги живлення, зовнішніх електромагнітних полів, тощо (рис. 1). Основними дестабілізуючими факторами є температура та вібрація, яка впливає на динамічні характеристики та стабільність ПРП. Крім того, вплив зовнішніх факторів не однозначний, так, наприклад, температурна залежність резонансної частоти має

гістерезис. При тому, якщо по відношенню до температури сам КР володіє певною інерційністю, тобто властивістю лінійного усереднення швидкозмінних теплових процесів, то по відношенню до вібрації дія цього ефекту незначна.

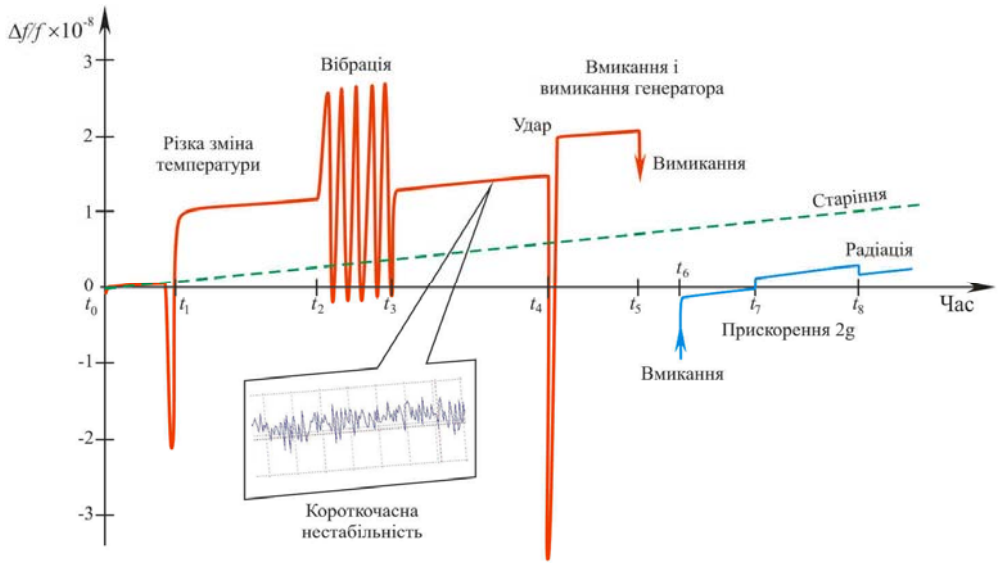


Рис. 1. Зміна частоти КР під дією зовнішніх дестабілізуючих факторів

Вплив температури та вібрації на частоту кварцових резонаторів є предметом багатьох теоретичних та експериментальних досліджень [1–4], які потребують детального розгляду і систематизації. Крім того необхідно намітити основні шляхи вирішення даної проблеми.

Основна частина

Так як вирішення питання температурної та вібраційної стабільності потребують різного підходу, зокрема різних методів її досягнення, розглянемо окремо дані види дестабілізуючих впливів.

Методи покращання температурних характеристик кварцових резонаторів в основному базуються на способах компенсації дії температурних впливів та забезпечення термостатування конструкцій генераторів. Методи зменшення температурних впливів на точнісні характеристики КР можна розділити на два основні підходи (рис. 2):

- без використання додаткових джерел тепла (пасивний);
- з використанням додаткових джерел тепла (активний).

Рис. 2. Класифікація методів покращення температурних характеристик КР

Активний метод базується на повному або частковому (резонатори-термостати) термостатуванні КР, а також регулюванні (стабілізації) потужності збудження п'єзорезонатора за рахунок зміни коефіцієнту зворотного зв'язку або напруги живлення [4]. Для зменшення температурної компоненти нестабільності частоти до величин порядку $(0{,}5\ldots1)10^{-8}$ необхідно стабілізувати температуру КР з точністю не гірше ніж $(0{,}01\ldots0{,}05)\ ^{\circ}C$ [4]. А якщо загальна нестабільність частоти генератора оцінюється величинами порядку $10^{-9}\ldots.10^{-10}$, то допустимі варіації температури кристалу не повинні перевищувати декілька тисячних градуса.

Такі великі вимоги до стабільності температури заставляють використовувати складні системи термостатування. В більшості випадків це подвійні термостати, де у внутрішньому термостаті (більш

точному) розташовуються кварцовий резонатор, а у зовнішньому – основні елементи схеми генератора та елементи підстроювання частоти. Температура термостату відповідає точці температурно-частотної характеристики (ТЧХ) з найменшим температурним коефіцієнтом частоти ТКЧ (для резонаторів АТ-зрізу T_{E1}, рис. 3).

За рахунок термостатування вдається суттєво покращити температурні характеристики КГ і отримати зниження нестабільності частоти мінімум на один-два порядки [4]. Однак, цей метод призводить до значного збільшення тривалості перехідних процесів встановлення коливань, що пов'язано зі значним часом виходу на режим термостатування пристроїв (від десятків хвилин до декількох годин), потребуючи при цьому значних енерговитрат. Це обмежує сферу використання даного методу.

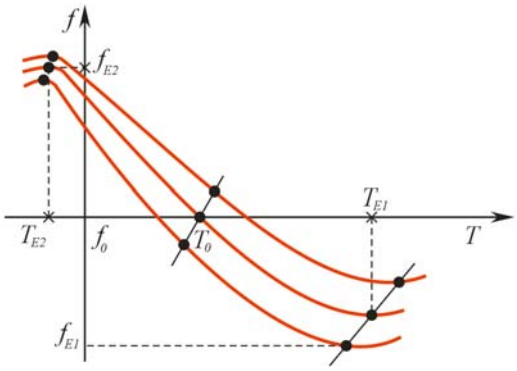


Рис. 3. ТЧХ КР за температурного впливу з постійною швидкістю: T_{E1}, T_{E2} і f_{E1}, f_{E2} – екстремальні точки і частоти, які їм відповідають

Деякою мірою дані питання можуть бути вирішені за рахунок використання резонаторів-термостатів, де нагрівний елемент розташований безпосередньо на п'єзоелементі. Але такий принцип роботи передбачає індукування додаткових термальних напруг, які зумовлені нерівномірним нагрівом п'єзоелемента, і, як наслідок, значне погіршення стабільності частоти (особливо температурно-динамічної складової), що ставить резонатори-термостати в один ряд з температурно-компенсованими кварцовими генераторами (ТККГ). Одним із непрямих активних методів впливу на тепловий режим КР є регулювання його потужності збудження. Зазвичай він використовується для стабілізації потужності збудження резонатора в схемах автоматичного регулювання амплітуди в комплексі з іншими заходами термокомпенсації та термостатування.

Відомі роботи [4, 5], де за рахунок регулювання потужності збудження (форсування) на етапі встановлення коливань КГ забезпечується більш стійкій запуск генератора та деякою мірою скорочується час виходу його на усталений режим. Але в цих роботах відсутній ґрунтовний аналіз процесів, які при цьому відбуваються, потребуючи тим самим більш детального вивчення даного питання.

До іншої групи методів (без використання додаткових джерел тепла) відносяться конструктивно-технологічні методи, які направлені на пошук нових типів зрізів (SC та ТД-зрізи), форми і конструкції КР (BVA, QAS), які дозволяють значно покращити його ТЧХ.

Проте, протиріччя з сучасними тенденціями по мікроміниатюризації та впровадженню SMD-технологій, погана технологічність та висока вартість нових типів резонаторів не дозволяють передбачити їх масове використання найближчим часом. Так масове впровадження резонаторів двоповоротних зрізів (SC, ТД) стримується завдяки їх підвищеній чутливості до кутових похибок під час виготовлення (чутливість в 10...20 разів більше, ніж у широковживаних технологічно простих резонаторів АТ-зрізу).

Термокомпенсація параметрів КР здійснюється за допомогою введення в схему термозалежних пристроїв, які формують відповідний керуючий вплив на п'єзорезонатор, що мінімізує дестабілізуючу дію зовнішніх температурних варіацій. В типових схемах ТККГ компенсація досягається використанням терморезистивного кола, яке забезпечує формування необхідної напруги компенсації при послідовному керуванні КР за допомогою варикапа. Для розширення температурного діапазону в схеми ТККГ вводять одне або декілька додаткових кіл формування напруги компенсації, які дозволяють більш точно відтворити досить складну температурно-частотну залежність п'єзорезонатора.

В даних схемах термокомпенсації без виділення інформації про температуру досягається розрахункова точність не краще ніж $0{,}5\cdot10^{-6}$ …$1\cdot10^{-7}$ в інтервалі температур -45…+85 °*C*. Це пояснюється, з однієї сторони складністю аналогової компенсації нелінійної ТЧХ КР, а з другої – конструктивним розділенням об'єкта регулювання (КР) і термочутливого елемента, що призводить до значних статичних та динамічних похибок компенсації.

Рис. 4. Функціональна схема цифрового ТККГ: ССКЗ – схема синтезу компенсуючої залежності

В системах з виділенням інформації про температуру використовується окремий датчик температури і його функції відокремлені від функцій синтезу компенсуючої залежності. Цифровий синтез компенсуючої залежності (рис. 4) дозволяє значно підвищити точність термокомпенсації (до значень порядку $0{,}5\cdot10^{-8}$) та спростити технологію налагодження ТТКГ.

Однак підвищення ефективності термокомпенсації досягається лише за умов обмеження швидкості температурних збурень. Спроби ліквідації цього недоліку за рахунок використання форсуючих елементів в колах регулювання або введення додаткового каналу компенсації динамічної похибки, напруга на виході якого пропорційна динамічному коефіцієнту ТЧХ та швидкості змін температури, не призводять до бажаних результатів, оскільки не усувають основного недоліку даних систем – наявність градієнтів температур між об'єктом регулювання та

термочутливим елементом. В деяких випадках використання це може викликати погіршення стабільності коливань, зокрема короткочасної, що зумовлено великими динамічними похибками регулювання.

В багатьох сучасних термокомпенсованих і термостатованих кварцових генераторах використовується один або декілька температурних датчиків, які використовуються як джерело інформації про температуру п'єзоелемента (ПЕ) або температуру навколишнього середовища. Температурні датчики через перепади температур між датчиком і кристалом кварцу, нерівномірність температури самого кристалу, теплову інерцію і нестабільність параметрів датчика призводять до похибок вимірювання температури.

Для досягнення більшої точності використовують суміщення частото-визначаючої та вимірювальної функцій КР за умов його багаточастотного збудження (резонатор-датчик) [5]. Багаточастотні кварцові генератори (БКГ) можуть використовувати дві (або більше) моди для збудження стандартних „одночастотних" КР, наприклад, коливання з частотами першої і третьої гармонік f_1 і f_3, або спеціально для цього сконструйовані двоповоротні кристали SC-зрізу. Збудження коливань кварцового генератора на двох частотах з виділенням різницевої частоти дозволяє провести ідентифікацію температурну поведінку п'єзорезонатора і отримати необхідну функцію регулювання, що значно підвищує стабільність системи при впливі на неї змін навколишнього середовища. Оскільки ці дві моди одночасно генеруються одним кристалом кварцу, то допоміжна мода *B* використовується для миттєвого визначення температури ПЕ з метою корекції частоти коливання основної моди *C*. Використання двочастотного генератора дозволяє досягти прецизійної компенсації температурного зсуву в термостатованому кварцовому генераторі (рис. 5).

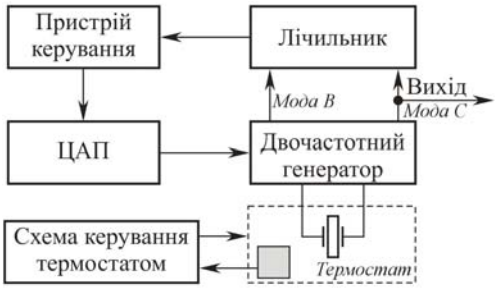


Рис. 5. Термостатований двочастотний кварцовий генератор

В даній схемі використовується комбінований метод усунення температурних зсувів частоти. Сигнал моди *B* використовується як датчик температури, а сигнал моди *C* є робочою частотою і опорною частотою контуру прецизійної компенсації. Сигнал з лічильника через пристрій керування поступає на цифро-аналоговий перетворювач, на виході якого формується сигнал керування генератором. Інформація про температуру в термостаті подається від окремого датчика і використовується для регулювання температури резистивних нагрівачів, що знаходяться в об'ємі термостатування. Температурна нестабільність таких двочастотних термостатованих генераторів як мінімум на порядок вища у порівнянні із вищерозглянутими класичними схемами.

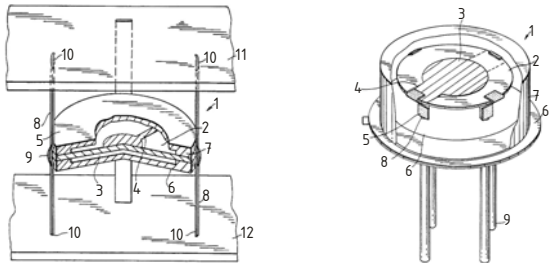
Більшість ПРП працюють в жорстких експлуатаційних умовах впливу нестаціонарного теплового потоку, ударів та вібрацій (при роботі в мобільній апаратурі, транспортуванні; автоматизованому установленні, ультразвуковому очищенні), акустичних шумів, деформацій і т. п. Ці фактори суттєво впливають на величину випадкових похибок п'єзорезонансних приладів і погіршують їх динамічні характеристики. Існує декілька методів зменшення чутливості ПРП до дестабілізуючих вібраційних впливів: конструктивно-технологічні, функціональні та комбіновані (рис. 6).

Конструктивно-технологічні методи базуються на усуненні резонансних явищ в конструкції, демпфіруванні, гасінні коливань, пошуку нових типів зрізів, формі, конструкції п'єзоелементів та кварцоутримувачів, корпусу КР, які дозволяють значно покращити термомеханічні та віброчастотні характеристики [1–3], але потребують великих матеріальних та часових затрат, значно ускладнюють боротьбу з виробничою багатопараметровою чутливістю, яка проявляється в чутливості характеристик ПРП до варіацій параметрів виробничих процесів.

Функціональні методи основані на послабленні дестабілізуючого впливу вібрації шляхом методів віброзахисту і віброкомпенсації або їх комбінації. Основним недоліком даних методів, який обмежує їх потенційні можливості, є просторове розподілення вібродатчика з активною зоною КР, що призводить до появи похибок між вимірюваною та реально діючою величиною вібродинамічного впливу. Відомий ряд пристроїв, які використовують для зменшення впливу вібрацій механічне демпфування. У них можуть використовуватися пружні властивості гуми та інших полімерних або композитних матеріалів, а також демпфуючі властивості підвіски. Недоліками механічних способів зниження впливу вібрацій є великі розміри демпфуючих пристроїв, їх різні демпфуючі властивості за просторовими координатами, а також недостатнє пригнічення вібрацій у низькочастотній області (до 100–300 Гц). При віброізоляції розробляється така конструкція резонатора (кварцоутримувача), яка мінімізує передачу вібрації від джерела до п'єзоелемента.

Рис. 6. Класифікація методів покращення віброчастотних характеристик КР

Розглянемо деякі конкретні методи, направлені на покращення віброчастотних характеристик кварцових резонаторів. В конструкції на рис. 7 практично вдалося усунути резонансні явища в конструкції за рахунок жорсткого закріплення монтажними затискачами із фосфорної бронзи (прямими або з вигином) опорної конструкції та використання віброізоляції і вакуумування. Дані конструктивні удосконалення значно знизили віброчутливість даного КР до дії вібрацій та прискорення. Однак дана конструкція має суттєві недоліки: неможливість отримання симетрії, що суттєво знижує вібростійкість, а також неможливість використання опуклих або плоско-опуклих пластин КР, що особливо актуально для АТ- і SC-зрізів. Затиснуті краї КР сильно впливають на динаміку активної частини, обмежуючи діапазон коливань пластини в області НЧ. Зниження рівня вібраційних прискорень в ПРП в цілому досягнуто комплексними мірами: застосування схеми двох'ярусної амортизації, демпфуючих мастик і компаундів; створенням необхідної конструктивної жорсткості конструкції і її елементів; виготовлення приладу обтічної форми, застосуванням свинцевих корпусів прибору і т. п. Система віброзахисту при механічному збуренні пристрою в діапазоні частот від 10 до 200 Гц з прискоренням $2{,}5g$ дозволяє знизити величину вібраційного прискорення, діючого безпосередньо на КР, до $0{,}03g$ на частотах вище 50 Гц і до $0{,}5-0{,}05g$ в діапазоні частот від 10 до 40 Гц, тобто в 5 разів.



а) *б)*

Рис. 7. Конструкція КР із круглим ПЕ:
а) зовнішній вигляд конструкції; б) конструкція КР у розрізі:
1 – опорна конструкція**; 2 – п'єзоелемент; 3 – електроди; 4 – виводи електродів; 5 та 10 – монтажні затискачі; 6 – основа корпусу; 7 – кришка корпусу з кільцевими прокладками (наприклад скляними, феритовими або із п'єзорезонансного матеріалу); 8 – ізолятор; 9 –** монтажні виводи; **11 – верхня кришка корпусу; 12 – нижня кришка корпусу скляними, феритовими або також із п'єзорезонансного матеріалу.**

Проте області застосування подібних систем обмежені, що обумовлено значними масо-габаритними показниками, складністю реалізації, неможливістю забезпечити необхідний рівень вібрації (десяті, соті долі g) на п'єзорезонаторі при дії вібраційного прискорення від $5g$ і вище (особливо в низькочастотних областях). Крім того параметри елементів системи віброзахисту ПРП значно залежать від частоти вібрації.

Перспективним є виготовлення нової форми компактного ПЕ АТ-зрізу шестикутної форми з покращеними вібраційними властивостями за рахунок міцного кріплення (рис. 8).

Проте, даний підхід вступає в протиріччя з сучасними тенденціями до мікромініатюризації та впровадженню SMD-технологій.

Значний вплив на короткочасні зміни частоти здійснюють різноманітні конструктивно-технологічні параметри КР, такі як, наприклад вид зрізу, конфігурація утримувача, число точок кріплення ПЕ та їх взаємне розташування і т. д. Застосовуючи методи удосконалення конструкції кварцоутримувачів, передусім необхідно дослідити частотні властивості конструкцій кварцоутримувачів, які повинні задовольняти положенню про те, щоб частота власних коливань конструкції була за межами діапазону частоти вібрації, діючої на КР.

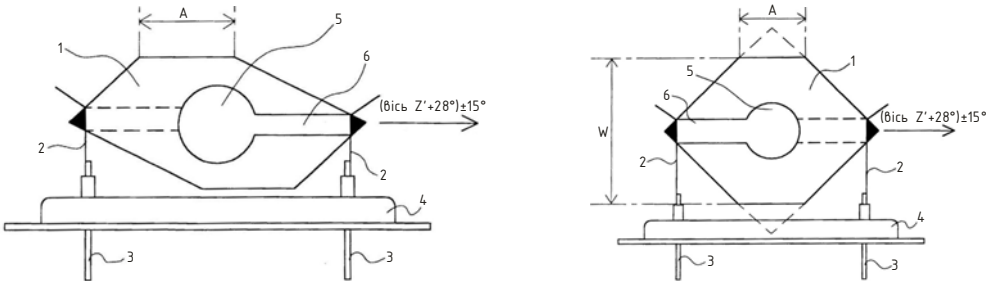


Рис. 8. Вигляд спереду ПЕ різних форм:
1 – шестигранний ПЕ; 2 – кварцоутримувачі; 3 – ізольовані свинцеві виводи; 4 – основа; 5 – електроди збудження; 6 – виводи електродів збудження

Метод розрахунку для круглих ПЕ з трьома і більше точками кріплення полягає в наступному. Визначаються початкові поля напруг та зміщень в кожній точці плоскості кварцової пластини як функції орієнтації пластини, направлення прискорення і розміщення точок кріплення. Потім виводяться рівняння, які пов'язують зміщення для товщинно-зсувних та згинаючих коливань через пружні постійні та розраховуються зміни частоти товщинно-зсувних коливань, які представлені у вигляді:

$$\Delta f / f = S(\psi, G, \theta, D/b, n_T, a_i), \quad (1)$$

тобто функції від кута ψ, утвореного вектором прискорення відносно осі x кварцу, прискорення G та зрізу θ, відношення D/b (діаметра до товщини), числа точок кріплення n_T і кута a_i ($i = 1,2,...,n_T$), який визначає положення точок кріплення відносно кристалографічної вісі x. Зроблені розрахунки частотних відхилень основної моди товщинно-зсувних коливань лінзового резонатора АТ-зрізу (θ=35°15′, D/b=8,88), закріпленого в чотирьох точках, в залежності від взаємного розташування точок кріплення (рис. 9), дають матеріал для вибору оптимального розміщення за критерієм мінімальної вібраційної чутливості для кожного із розглянутих варіантів утримувачів (2-точкового, 3- точкового, тощо). Одним із недоліків даного методу є те, що при певних вібраційних впливах може порушуватися симетрія конструкції і відбуватися деформація елементів кварцоутримувача, а це, в свою чергу, призведе до розстроювання режиму коливання та асиметрії центрів підтримки КР. Виробничі допуски при збірці цих типів резонаторів можуть також призвести до широкої зміни у віброчутливості.

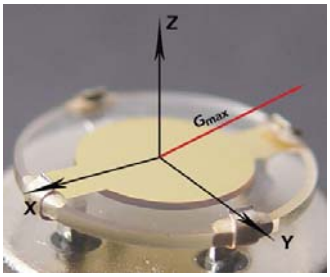


Рис. 9. Приклад ПЕ закріпленого в чотирьох точках з мінімальною віброчутливістю

На рис. 10 зображені конструкції КР з різними типами кварцоутримувачів. Всі ці конструкції розробленні з урахуванням вимог, які пред'являються до зниження змін частоти через зміни силочастотних напруг та впливу вібрацій.

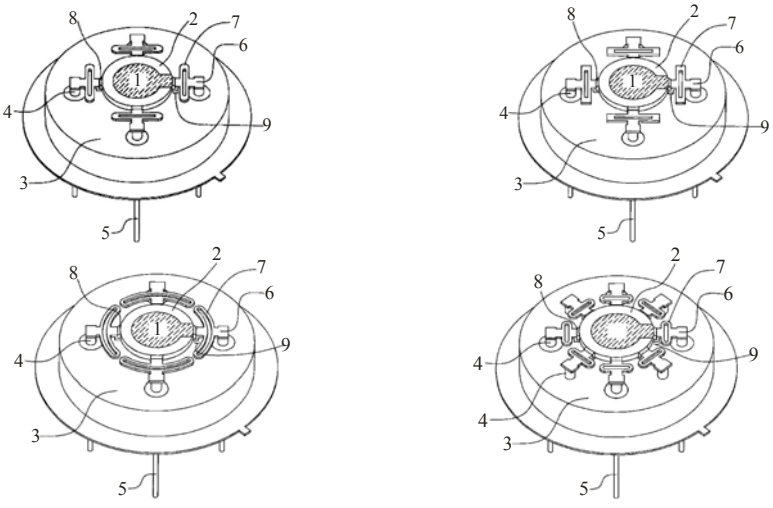


Рис. 10. Конструкції кварцоутримувачів:
1 – верхній електрод резонатора; 2 – КР; 3 – корпус; 4 – жорсткі монтажні стержні; 5 – електричні виводи; 6 – монтажні клеми; 7 – амортизаційний елемент; 8 – струмопровідний клей; 9 – підтримуюча поличка

В деяких кварцових резонаторах можуть використовуватися виступи, вирізи або кріплення за допомогою клею. Введення амортизаційного елементу (рис. 10) дозволяє зменшити остаточні напруги конструкції.

За допомогою створення безелектродної конструкції кварцового резонатора на магнітному підвісі, який оптимально термічно ізольований від іншої частини схеми усунуті механічні напруги на КР (рис. 11).

Таким чином, конструктивно-технологічними методами можна добитись зниження вібраційної

чутливості КР на один і навіть на два порядки. Але ці методи потребують наявності високорозвинутої технологічної бази, вони складні і трудомісткі в виконанні. Крім того, вони зовсім непридатні в датчиках механічних величин, де потрібна висока силова чутливість КР. Останнім часом в ПРП стали використовувати функціонально-компенсаційні методи віброкомпенсації, представлені структурними схемами на рис. 12, які основані на використанні додаткового вібродатчика, призначення якого полягає в змінах параметрів вібрації, що діє безпосередньо на КР. За способом впливу сигналу компенсації можна виділити два типи схем віброкомпенсації, які містять датчики [3]. В першому випадку напруга компенсації поступає з виходу кола формування сигналу компенсації на коло керування частотою ПРП та підстроює змінене значення резонансної частоти КР до номінальної (рис 12, *а*). В другому випадку (рис. 12, *б*). сигнал компенсації через узгоджуюче коло поступає на електроди п'єзоелемента, створюючи в ньому механічні напруги, що призводять до компенсації напруг, які викликані дією вібрації.

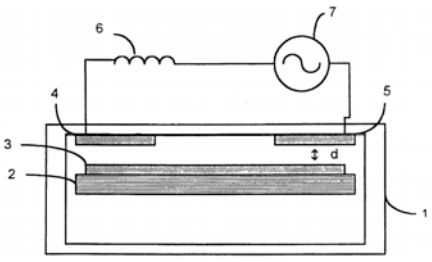


Рис. 11. Мікромеханічний пристрій магнітного підвісу:
1– корпус; 2– кварцова пластина; 3, 4, 5 – пластини конденсатора; 6 – зовнішня індуктивність; 7 – генератор

В конструкції кварцового генератора на рис. 13 вплив прискорення або вібрації на вихідний сигнал зведені до мінімуму. Завдяки своїй покращеній стабільності даний КГ може застосовуватися у системах навігації, радіолокації, пристроях телекомунікації, космічного та військового обладнання. Перший акселерометр 9, який виготовлений за MEMS технологією, встановлюється безпосередньо на корпусі КР 4, що дозволяє більш близько розташувати акселерометр до п'єзопластини 5 і забезпечити більш точне вимірювання рівню вібрації. Додатково встановлений другий акселерометр 10, розташований на бічній стороні корпусу КР 4, може здійснювати вимірювання вздовж іншої осі, ніж перший акселерометр 9. Третій акселерометр 11, розташований на верхній частині корпусу КР 4. Кожен із трьох акселерометрів може здійснювати вимірювання вздовж своєї осі, орієнтованих, наприклад, ортогонально. За рахунок того, що в даній конструкції датчики просторово рознесені від КР, завжди існуватиме похибка у вимірюваннях, що призведе до неточності запропонованого методу віброкомпенсації. Встановлення ж акселерометричних датчиків безпосередньо на ПЕ вплине на власні коливання системи і порушить її баланс. Крім того в запропонованому методі використовуються 3 одноосних акселерометри, які рекомендується розташовувати ортогонально. Зробити це практично неможливо, тому завжди існуватиме похибка просторової орієнтації.

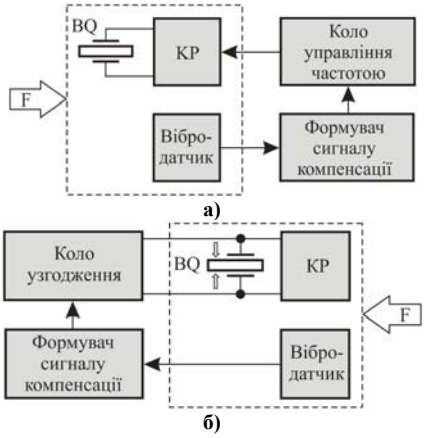


Рис. 12. Функціональні способи віброкомпенсації:
а) компенсація за рахунок електронного керування; б) компенсація за рахунок електромеханічного керування

Слід розглянути також метод компенсації зовнішніх механічних впливів, де кварцовий генератор містить два електрично послідовно ввімкнених кварцових резонатори, у яких кварцові п'єзоелементи розташовані таким чином, що їх вектори *g*-чутливості розташовані антипаралельно, що надало змогу значно знизити індуковані зміни частот за рахунок прискорення в усіх напрямках (рис. 14) та підвищити його стабільність. Зазвичай, конденсатор 4 містить варикап, тобто напруга є змінною, вона встановлюється під час вібраційних випробувань так, щоб мінімізувати чутливість до прискорення коливального контуру 5 (рис. 14). Для зменшення впливу вібрації на кварцові п'єзоелементи і ефективної компенсації потрібне визначення напрямку максимальної чутливості п'єзоелементів до прискорень, що є важким завданням. Крім того, компенсація вібраційних впливів відбувається всього лише за одним із напрямків впливу вібрації.

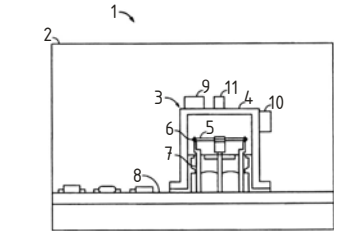


Рис. 13. Поперечний переріз генератора
1 – КГ; 2 – корпус; 3 – КР; 4 – корпус КР; 5 – п'єзопластина КР; 6 – кварцоутримувач; 7 – контакти; 8 – плата; 9 – перший акселерометр; 10 – другий акселерометр; 11 – третій акселерометр

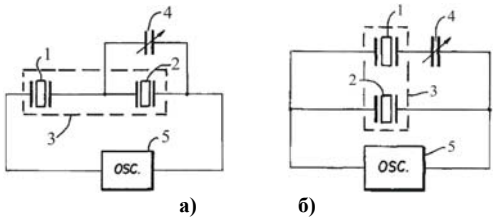
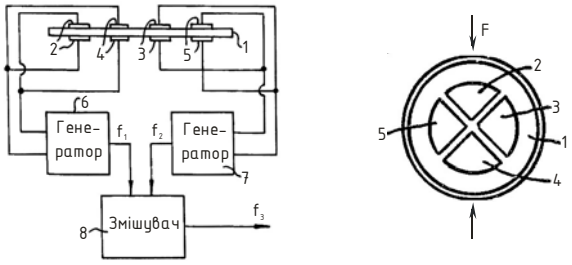


Рис. 14. Структурні схеми двох КР з різними величинами віброчутливості:
а) послідовно з'єднанні КР ; б) паралельно з'єднанні КР: 1, 2 – кварцові резонатори; 3 – композитний КР; 4 – варикап; 5 – коливальний контур

Всі описані вище функціональні методи віброкомпенсації мають істотні недоліки. Перш за все, вібродатчик і резонатор просторово рознесені, що

призводить до виникнення вібраційних градієнтів. Крім того, для реалізації пристроїв компенсації, необхідне знання точних градуювальних характеристик як датчика, так і КР для формування функції компенсації.

Перспективним для компенсації вібраційних впливів є багаточастотний метод отримання інформації з двох різних збуджених мод КР, завдяки їх різницевій частоті (рис. 15). При відсутності сили, прикладеної до кристалу, два кварцових генератори 6 і 7 одночасно працюють в ангармонічних режимах. Резонансні частоти двох ангармонічних мод різні, а сигнал f_3 на виході змішувача 8 буде свідчити про нульову силу. Зовнішня дія сили F викличе зміни обох вихідних частот ($f_1 = f'_1 + \Delta f_1$ *і* $f_2 = f'_2 + \Delta f_2$) пропорційно прикладеній силі. Вихідні сигнали f_1 і f_2 з генераторів поступають в змішувач 8, на виході якого формується різницевий сигнал $f_3 = f'_1 + \Delta f_1 - f'_2 - \Delta f_2 = f'_3 + \Delta f$. Частоти f'_1 і f'_2 є резонансними частотами ортогональних мод при нульовій силі F.



а) **б)**

Рис. 15. Структурна схема двочастотного генератора (а) і силочастотного кварцового перетворювача (б)
1 – пластина КР; 2-5 – набір електродів збудження; 6, 7– схема КГ; 8 – змішувач

До недоліку даного методу слід віднести:

- по-перше, п'єзопластини містять різні групи електродів збудження нанесених на поверхні різних КР, рознесених фізично у просторі, які будуть мати відповідно різні фізичні властивості, у тому числі різну реакцію на дію зовнішніх дестабілізуючих чинників (температура, вібрація, тощо);

- по-друге, конструкція двочастотного генератора містить дві різних активних частини (генератори), що додатково унеможливлює отримання ідентичної інформації.

Ефективним методом мінімізації впливу вібрації є функціональний метод компенсації, який базується на безпосередньому отриманні інформації про дестабілізуючі впливи на п'єзоелемент за багаточастотного збудження п'єзорезонатора. Але цей метод потребує стабільності градуювальних характеристик за часом і наявності декількох резонансних частот. Даний метод використовується для компенсації температурних дестабілізуючих факторів на ПРП та КР однак він не враховує вібраційні складові, що мають місце при дії на ПРП вібрації і які істотно впливають на зсуви частоти КР.

Аналіз існуючих методів підвищення вібраційної стійкості п'єзорезонансних пристроїв показав, що більшість з них вступає в протиріччя із сучасними вимогами мініатюризації радіоелектронної апаратури. Одним із перспективних методів, який задовольняє даним вимогам є переведення кварцового резонатора до багаточастотного режиму збудження з одночасним виділенням інформації різницевої частоти про дестабілізуючі впливи на п'єзоелемент.

Сімейство автогенераторів на основі кварцових резонаторів досить широке. Поряд зі звичайними кварцовими генераторами (ХО) можна відзначити вакуумовані мініатюрні (ЕМХО); прецизійні (РХО); тактові (Clock XO); термостабілізовані (ОСХО); термокомпенсовані (ТСХО); із цифровою компенсацією (DTCXO); з мікропроцесорною компенсацією (МСХО); керовані напругою по частоті (VCXO); синхронізовані за фазою (PLO), а також існують квантові стандарти частоти (рис. 16).

Основними напрямками удосконалення кварцових резонаторів та генераторів на їх основі є:

- мікроміниатюризація (створені SMD-генератори з вимогами до температурної стабільності частоти не гірше $1 \cdot 10^{-8}$ та об'єму ≤ 10 см^3 при висоті до 14 мм);

- суттєве підвищення вимог до експлуатаційної стабільності частоти до $1 \cdot 10^{-10}$ для довготривалої і $1 \cdot 10^{-12}$ короткочасної; ці вимоги пред'являються апаратурою ряду радіоелектронних систем як мобільних (GSM, UMTS, WiMax) так навігаційних (ГЛОНАСС/GPS), а також для вирішення задач синхронізації мереж зв'язку, особливо базових станцій стандарту CDMA);

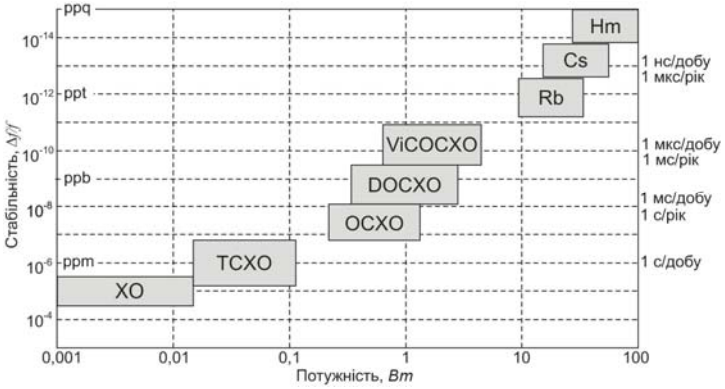


Рис. 16. Ієрархія джерел стабільних коливань
ХО (Crystal Oscillator) – кварцові генератори (10^{-5}); ТСХО (Temperature Controlled Crystal Oscillators**) – термокомпенсовані аналогові КГ (10^{-6}); ОСХО (**Oven Controlled Crystal Oscillators**) – термостатовані КГ (10^{-7}…10^{-8}); DOCXO (**Double Oven Controlled Crystal Oscillators**) – КГ з подвійним термостатуванням (10^{-9}); ViCOCXO – віброкомпенсовані термостатовані КГ (10^{-9}…10^{-10}); Rb – рубідієвий стандарт частоти (10^{-12}); Cs – цезієвий стандарт частоти (10^{-13}); Hm – водневі мазери (10^{-15})**

- зменшення рівнів фазових шумів (наприклад, генераторів на 10 МГц: до -108 дБ/Гц для $\Delta f = 1$Гц; до -157 дБ/Гц для Δf=100 Гц; і до -168 дБ/Гц для Δf=10 кГц);

- зменшення енергоспоживання;

- підвищення надійності, удосконалення параметрів і експлуатаційних характеристик, а також забезпечення їх відтворюваності;
- зниження вартості.
- створення прецизійних та ультрапрецизійних кварцових резонаторів;
- малошумні та ультрамалошумні;
- високочастотні;
- стійкі до особливо жорстких зовнішніх дестабілізуючих факторів;
- генератори з мінімальними часом готовності та енергоспоживанням.

Висновки

Здійснено уточнення класифікації методів покращення температурних та віброчастотних характеристик кварцових резонаторів. Розглянуто ансамбль дестабілізуючих факторів, серед яких окреслено круг основних та здійснена їх класифікація. Виявлено, що основними дестабілізуючими факторами є температура та вібрація, яка впливає на динамічні характеристики та стабільність п'єзорезонансних пристроїв. Крім того, вплив зовнішніх факторів не однозначний, так, наприклад, температурна залежність резонансної частоти має гістерезис. При тому, якщо по відношенню до температури сам кварцовий резонатор володіє певною інерційністю, тобто властивістю лінійного усереднення швидкозмінних теплових процесів, то по відношенню до вібрації дія цього ефекту незначна. Розглянуто методи покращання температурних та віброчастотних характеристик кварцових резонаторів. Встановлено, що в умовах мікромініатюризації кварцових резонаторів найбільш перспективним для ідентифікації теплового стану є використання багаточастотних режимів збудження. Розглянуто конкретні методи, направлені на покращення віброчастотних характеристик кварцових резонаторів. Окреслено основні напрямки удосконалення джерел формування стабільних коливань. Для компенсації температурних та вібраційних впливів запропонований багаточастотний метод отримання інформації з кількох різних збуджених мод кварцового резонатора, завдяки їх різницевій частоті, як найбільш перспективний метод, який дозволяє вирішити поставлені задачі щодо мінімізації впливу ансамблю дестабілізуючих факторів.

Література

1. Стецюк В. І. Вібраційна стабільність кварцових резонаторів / Стецюк В. І. // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2007 – С. 165–168.

2. Стецюк В. І. Теоретичні та практичні методи дослідження вібродинамічних характеристик п'єзорезонансних пристроїв / В. І. Стецюк // On modern achievements of science and education. Proceedings of XI international conference. – Jerusalem, Israel. 29 September – 6 October 2016. – P. 100–103.

3. Стецюк В. І. Методи мінімізації вібраційних впливів на стабільність п'єзорезонансних пристроїв. "Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций" / В. І. Стецюк, А. В. Костюк // Материалы 5-й международной молодёжной научно-техн. конф. – Севастополь : Изд. "Вебер", 2009. – 106 с.

4. Таранчук А. А. Ідентифікація теплового стану кварцового резонатора на етапі встановлення коливань / А. А. Таранчук, С. К. Підченко // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – Харків, 2004. – № 3(7). – С. 36–42.

5. Колпаков Ф. Ф. Многочастотный подход к проблеме инвариантности пьезорезонансных устройств / Ф. Ф. Колпаков // Радиотехника. – 1987. – № 9.– С. 16–18.

References

1. Stetsyuk V. I. Vibratsiyna stabilnist kvartsovykh rezonatoriv. Herald of Khmelnytskyi National University. – Khmelnytskyi, 2007 – s. 165–168.

2. Stetsiuk V. I. Teoretychni ta praktychni metody doslidzhennia vibrodynamichnykh kharakterystyk piezorezonansnykh prystroiv // On modern achievements of science and education. Proceedings of XI international conference. – Jerusalem, Israel. 29 September – 6 October 2016. – P. 100–103.

3. Stetsiuk V. I., Kostiuk A. V. Metody minimizatsii vibratsiinykh vplyviv na stabilnist piezorezonansnykh prystroiv. "Sovremennie problemi radyotekhnyky i telekommunykatsyi" // Materyali 5-y mezhdunarodnoi molodëzhnoi nauchno-tekhn. konf. – Sevastopol: yzd. "Veber", 2009. s. 106.

4. Taranchuk A. A., Pidchenko S. K. Identyfikatsiia teplovoho stanu kvartsovoho rezonatora na etapi vstanovlennia kolyvan // Radioelektronni i kompiuterni systemy. – Kharkiv, 2004.– № 3(7). – S. 36–42.

5. Kolpakov F. F. Mnohochastotniy podkhod k probleme invaryantnosty pezorezonansnikh ustroistv // Radyotekhnyka. – 1987. – № 9.– S. 16–18.

Рецензія/Peer review : 19.11.2017 р. Надрукована/Printed :12.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Мартинюк В.В.

УДК 621.396.12

В.І. ЛУЖАНСЬКИЙ, Л.В. КАРПОВА, В.А. ВОЛОШИНА
Хмельницький національний університет

ВПЛИВ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ БАЗОВОЇ СТАНЦІЇ В СИСТЕМАХ РУХОМОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ НА ЙМОВІРНІСТЬ БІТОВОЇ ПОМИЛКИ НА ВХОДІ ПРИЙМАЧА МОБІЛЬНОГО ТЕРМІНАЛУ ТА ВІДСТАНІ МІЖ НИМИ

Стаття присвячена дослідженню впливу основних технічних параметрів базової станції (БС) на ймовірність бітової помилки, співвідношення сигнал/шум на вході приймача мобільної станції (МС) при відповідній швидкості передачі цифрового потоку. Наводяться розрахункові формули для визначення необхідної відстані між базовою станцією та мобільним терміналом залежно від заданої ймовірності бітової помилки та потужності сигналу на вході приймача.

Ключові слова: ймовірність бітової помилки, співвідношення сигнал/шум,швидкість цифрового потоку, відстань між БС та МС, системи рухомого радіозв'язку.

V.I. LUZHANSKIY, L.V. KARPOVA, V.A. VOLOSHYNA
Khmelnytsky National University

THE INFLUENCE OF THE MAIN PARAMETERS OF THE BASIC STATION IN THE SYSTEMS OF MOBILE RADIO COMMUNICATION ON THE POSSIBILITY OF BITE ERROR ON THE MOBILE TERMINAL RECEIVER AND BETWEEN THE MOBILE TERMINAL

The development of wireless technologies has allowed users to have a connection anywhere in the world. The growth of advances in research and development of wireless communication technologies, the increasing capacity of electronic devices contribute to the spread of services for mobile users. Wireless networks are becoming more interactive, which contributes to the paradigm shift to new generations of mobile networks where continuous mobility in heterogeneous networks is the basic principle. The article is devoted research of influence of speed of data transmission in a cellular mobile radio system with code division of channels in appropriate ratios of signal/noise at the input of the receiver the probability of bit error and finding the maximum number of active subscribers in the cell. The influence of the basic technical parameters of the base station (BS) on the probability of a bit error rate, the signal/noise ratio at the input of the receiver of the mobile station (MS) at the appropriate digital transmission rate. The calculation for mulasare used to determine the required distance between the base station and the mobile terminal, depending on the given probability of the biterr or rate and the signals trength of the receiver input. The probability of a bit error rate in the systems of the mobile communication with the phase modulation of the BPSK and the energy expended on the transmission of one bitis calculated. The paper describes the application of error-correcting modulation techniques, effective systems balatonring access to distribution channels, reduce system noise internally. Calculation formulas for determining the signal-to-noise ratio at any point in mobile communications and also to control the degree of change of this relationship when moving mobile station.

Keywords: bit error probability, signal/noise ratio, digitals tream speed, distance between BS and MS, mobile radiosystem.

Вступ

Протягом останніх тридцяти років процес комунікації між людьми значно змінився та перейшов на значно вищий, у розуміння можливостей, рівень. Розвиток бездротових технологій дозволив користувачам мати зв'язок у будь-якій точці світу. Найближчим часом розвиток бездротових технологій матиме ще більший вплив на спілкування людей та їх взаємодію. Зростання досягнень в галузі досліджень і розробки технологій бездротового зв'язку, збільшення можливостей електронних пристроїв сприяють розповсюдженню послуг для мобільних користувачів. Бездротові мережі стають все більш взаємодіючими, що сприяє зрушенню парадигми до нових поколінь мобільних мереж, де безперервна мобільність в неоднорідних мережах стає основним принципом. Це покоління згадується як четверте покоління (4G).

Створення глобальної мережі Інтернет та виникнення масового сервісу в області мобільних телекомунікацій призвело до збільшення швидкості передачі цифрових потоків інформації. Разом з тим підвищення швидкості передачі даних в мережах мобільного зв'язку потребує заданої якості при допустимій ймовірності бітових помилок.

Аналіз стану досліджень та публікацій. Аналіз публікацій (наприклад, [1–4]) показує недостатність проведених досліджень у цьому напрямку.

Постановка задачі. Метою даної статті є дослідження впливу основних параметрів базової станції в системах рухомого радіозв'язку та ймовірності бітової помилки на вході приймача мобільного терміналу та відстані між БС та МС в умовах забудови міста.

Результати дослідження. Потужність сигналу на вході приймача визначається як:

$$P_{np} = 10^{0.1 \cdot p_{np}}, \quad (1)$$

де P_{np} – потужність сигналу на вході приймача МС, Вт; p_{np} – потужність, що задається на вході приймача, дБВт.

Тактовий інтервал Т має вигляд:

$$T = 1/R, \quad (2)$$

де R– швидкість передачі даних .

Енергію, яка витрачається на передачу одного біта(E_b), визначаємо як:

$$E_b = P_{пр} \cdot T. \quad (3)$$

По формулі (4) визначимо потужність шумів на вході приймача МС:

$$P_{ш.пр} = n \cdot k \cdot \Delta f_{пр}, \quad (4)$$

де n – коефіцієнт шуму приймача ($n = 9\,дБ$); $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ $Вт/Гц \cdot град$ – стала Больцмана; $T_0 = 290\,K$ – шумова температура в градусах Кельвіна; $\Delta f_{пр}$ – ширина смуги пропускання високочастотного тракту приймача.

Спектральна щільність потужності білого шуму буде представлена наступним чином:

$$N_0 = n \cdot k \cdot T_0, \quad (5)$$

звідси:

$$N_0 = k \cdot T_0 + n = -204 + 9 = -195 \ \frac{дБ \cdot Вт}{Гц}.$$

Результат можна записати у вигляді:

$$N_0 = 10^{-19.5} = 3.16 \cdot 10^{-20} \ \frac{Вт}{Гц}.$$

Відношення сигнал/шум на вході приймача МС:

$$E_b / N_0. \quad (6)$$

Розраховуємо ймовірність бітової помилки за наступною формулою:

$$P_{пом} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot E_b}{N_0}}\right). \quad (7)$$

Визначимо ймовірність бітової помилки в системах стільникового зв'язку з фазовою маніпуляцією ФМ-2 (BPSK) в межах ймовірності бітової помилки 10^{-2} - 10^{-8}.

При швидкості передачіR_1=10Мбіт/с визначимо допустиму потужність сигналу ($p_{пр}$) на вході приймача МС, яка забезпечує ймовірність бітової помилки 10^{-2}.

Знаходимо Q-функцію [1] для ймовірності помилки 10^{-2} (Q(2.32)). По формулі (7) знаходимо значення $E_{b1} = 8.5 \cdot 10^{-20}$ *Дж*. Аналогічно визначаємо Q-функції для ймовірності помилок 10^{-3}-10^{-8} та значення E_{b2}-E_{b7}.

Таблиця 1

Q-функція при швидкості 10 Мбіт/с

Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	Q_7
2.32	3.07	3.71	4.26	4.75	5.19	5.61

Тактовий інтервал Т дорівнює:

$$T_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{10^7 \ біт/с} = 10^{-7} \ с.$$

Розрахуємо потужність сигналу на вході приймача МС при швидкості R_1=10 Мбіт/с:

$$P_{пр1} = \frac{E_{b1}}{T_1} = \frac{8.5 \cdot 10^{-20}}{10^{-7}} = 8.5 \cdot 10^{-13} \ Вт. \quad P_{пр5} = \frac{E_{b5}}{T_1} = \frac{35.6 \cdot 10^{-20}}{10^{-7}} = 35.6 \cdot 10^{-13} \ Вт.$$

$$P_{пр2} = \frac{E_{b2}}{T_1} = \frac{14.9 \cdot 10^{-20}}{10^{-7}} = 14.9 \cdot 10^{-13} \ Вт. \quad P_{пр6} = \frac{E_{b6}}{T_1} = \frac{42.6 \cdot 10^{-20}}{10^{-7}} = 42.6 \cdot 10^{-13} \ Вт.$$

$$P_{пр3} = \frac{E_{b3}}{T_1} = \frac{21.7 \cdot 10^{-20}}{10^{-7}} = 21.7 \cdot 10^{-13} \ Вт. \quad P_{пр7} = \frac{E_{b7}}{T_1} = \frac{49.7 \cdot 10^{-20}}{10^{-7}} = 49.7 \cdot 10^{-13} \ Вт.$$

$$P_{пр4} = \frac{E_{b4}}{T_1} = \frac{28.7 \cdot 10^{-20}}{10^{-7}} = 28.7 \cdot 10^{-13} \ Вт.$$

Енергія, що витрачається на передачу одного біта розраховується таким чином:

$$E_{b1} = \frac{Q_1^2 \cdot N_0}{2} = \frac{2.32^2 \cdot 3.16 \cdot 10^{-20}}{2} = 8.5 \cdot 10^{-20} \ Дж.$$

$$E_{b2} = \frac{Q_2^2 \cdot N_0}{2} = \frac{3.07^2 \cdot 3.16 \cdot 10^{-20}}{2} = 14.9 \cdot 10^{-20} \ Дж.$$

$$E_{b3} = \frac{Q_3^2 \cdot N_0}{2} = \frac{3.71^2 \cdot 3.16 \cdot 10^{-20}}{2} = 21.7 \cdot 10^{-20} \ Дж.$$

$$E_{b4} = \frac{Q_4^2 \cdot N_0}{2} = \frac{4.26^2 \cdot 3.16 \cdot 10^{-20}}{2} = 28.7 \cdot 10^{-20}\ Дж.$$

$$E_{b5} = \frac{Q_5^2 \cdot N_0}{2} = \frac{4.75^2 \cdot 3.16 \cdot 10^{-20}}{2} = 35.6 \cdot 10^{-20}\ Дж.$$

$$E_{b6} = \frac{Q_6^2 \cdot N_0}{2} = \frac{5.19^2 \cdot 3.16 \cdot 10^{-20}}{2} = 42.6 \cdot 10^{-20}\ Дж.$$

$$E_{b7} = \frac{Q_7^2 \cdot N_0}{2} = \frac{5.61^2 \cdot 3.16 \cdot 10^{-20}}{2} = 49.7 \cdot 10^{-20}\ Дж.$$

Використовуючи формулу (6) визначимо співвідношення сигнал/шум на вході приймача МС при швидкості R_1=10 Мбіт/с. Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача МС при швидкості 10 Мбіт/с надані в таблиці 2.

$$\frac{E_{b1}}{N_0} = \frac{8.5 \cdot 10^{-20}\ Дж}{3.16 \cdot 10^{-20}\ Вт/Гц} = 2.68. \quad \frac{E_{b5}}{N_0} = \frac{35.6 \cdot 10^{-20}\ Дж}{3.16 \cdot 10^{-20}\ Вт/Гц} = 11.27.$$

$$\frac{E_{b2}}{N_0} = \frac{14.9 \cdot 10^{-20}\ Дж}{3.16 \cdot 10^{-20}\ Вт/Гц} = 4.72. \quad \frac{E_{b6}}{N_0} = \frac{42.6 \cdot 10^{-20}\ Дж}{3.16 \cdot 10^{-20}\ Вт/Гц} = 13.48.$$

$$\frac{E_{b3}}{N_0} = \frac{21.7 \cdot 10^{-20}\ Дж}{3.16 \cdot 10^{-20}\ Вт/Гц} = 6.87. \quad \frac{E_{b7}}{N_0} = \frac{49.7 \cdot 10^{-20}\ Дж}{3.16 \cdot 10^{-20}\ Вт/Гц} = 15.73.$$

$$\frac{E_{b4}}{N_0} = \frac{28.7 \cdot 10^{-20}\ Дж}{3.16 \cdot 10^{-20}\ Вт/Гц} = 9.08.$$

Таблиця 2

Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача при швидкості 10 Мбіт/с

Ймовірність бітової помилки	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}
Потужність сигналу на вході приймача, дБВт	-120.7	-118.3	-116.6	-115.4	-114.48	-113.7	-113.036
Співвідношення сигнал/шум, E_b / N_0	2.68	4.72	6.87	9.08	11.27	13.48	15.73

При швидкості передачі R_2=50 Мбіт/с визначимо потужність сигналу ($p_{пр1}$) на вході приймача при ймовірності бітової помилки 10^{-2} .

Знаходимо Q-функцію [1] для ймовірності помилки 10^{-2} (Q(2.17)). По формулі (7) знаходимо значення $E_{b1} = 7.44 \cdot 10^{-20}\ Дж$. Аналогічно визначаємо Q-функції для ймовірності помилок 10^{-3}-10^{-8} та значення E_{b2}-E_{b7}.

Таблиця 3

Q-функція при швидкості 50 Мбіт/с

Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	Q_7
2.17	2.96	3.6	4.17	4.66	5.12	5.54

Тактовий інтервал T_2дорівнює:

$$T_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{5 \cdot 10^7} = 2 \cdot 10^{-8}\ с.$$

Визначимо потужність сигналу на вході приймача МС за формулою (1), енергію, яка витрачається на передачу одного біта за формулою (3) та співвідношення сигнал/шум на вході приймача МС за формулою (6) при швидкості R_2=50 Мбіт/с. Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача МС при швидкості 50 Мбіт/с надані в таблиці 4.

Таблиця 4

Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача при швидкості 50 Мбіт/с

Ймовірність бітової помилки	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}
Потужність сигналу на вході приймача, дБВт	-114.3	-111.6	-109.9	-108.6	-107.7	-106.8	-106.15
Співвідношення сигнал/шум, $E_в/N_0$	2.35	4.38	6.48	8.69	10.86	13.11	15.35

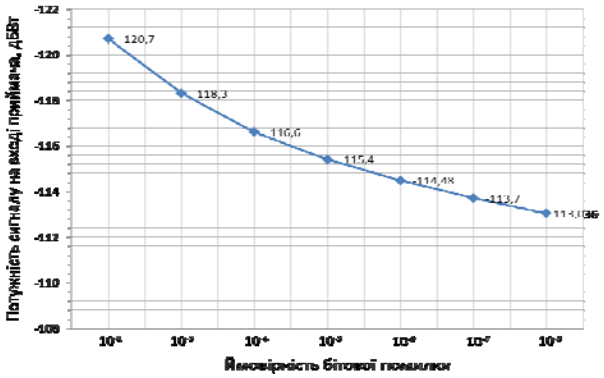


Рис. 1. Залежність значення потужності сигналу на вході приймача від ймовірності бітової помилки при швидкості 10 Мбіт/с

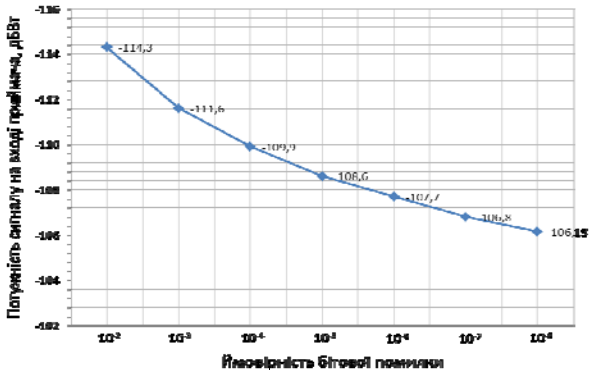


Рис. 2. Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача при швидкості 50 Мбіт/с

При швидкості передачі R_3=500 Мбіт/с визначимо потужність сигналу ($p_{пр1}$) на вході приймача при ймовірності бітової помилки 10^{-2} .

Знаходимо Q-функцію [1] для ймовірності помилки 10^{-2} (Q(2.11)). По формулі (7) знаходимо значення $E_{b1} = 7.03 \cdot 10^{-20}$ *Дж*.

Таблиця 5

Q-функція при швидкості 500 Мбіт/с

Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	Q_7
2.11	2.92	3.58	4.14	4.64	5.09	5.5

Тактовий інтервал дорівнює: $T_3 = 1/R_3 = 1/5 \cdot 10^8 = 2 \cdot 10^{-9}$ *с*.

Визначимо потужність сигналу на вході приймача МС за формулою (1), енергію, яка витрачається на передачу одного біта за формулою (3) та співвідношення сигнал/шум на вході приймача МС за формулою (6) при швидкості R_3=500 Мбіт/с. Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача МС при швидкості 500 Мбіт/с надані в таблиці 6.

Таблиця 6

Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача при швидкості 500 Мбіт/с

Ймовірність бітової помилки	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}
Потужність сигналу на вході приймача, дБВт	-104.5	-101.7	-99.9	-98.7	-97.7	-96.9	-96.2
Співвідношення сигнал/шум, $E_в/N_0$	2.22	4.26	6.4	8.57	10.77	12.95	15.13

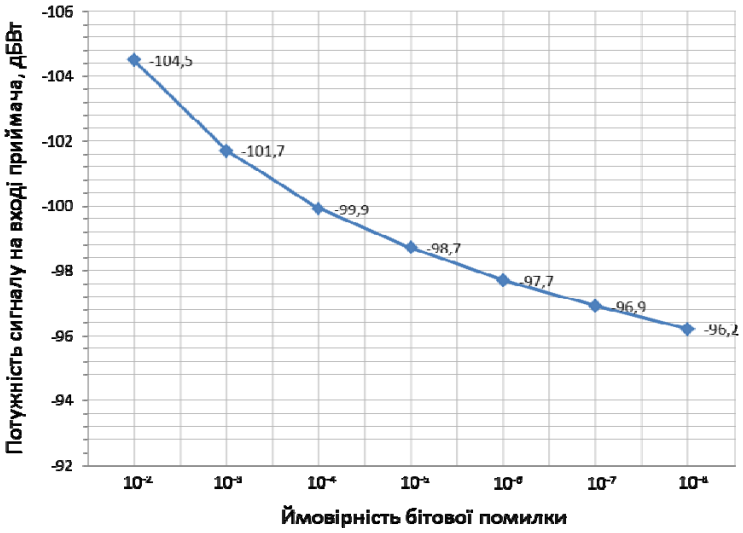


Рис. 3. Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача при швидкості 500 Мбіт/с

Застосуємо емпіричну формулу для розрахунку середнього рівня сигналу на вході приймача МС за відомою моделлю Окамури-Хати, яка побудована на графічній та аналітичній апроксимації результатів натурних вимірів. Розрахуємо необхідні відстані r між БС та МС при відповідних потужностях сигналу на вході приймача мобільного терміналу та заданих імовірностях бітових помилок 10^{-5} – 10^{-8}, що забезпечить високу якість мобільного зв'язку. Крім цього визначимо максимальне значення відстані r_{max} БС та МС, яка відповідає пороговому значенню потужності сигналу на вході приймача мобільного терміналу при імовірності бітової помилки 10^{-2}. Емпірична формула Окамури-Хати в умовах забудови міста виглядає наступним чином [2]:

$$P_{прМС} = P_{перБС} + G_{БС} - 69{,}55 - 26{,}16 \lg f_{ср} + 13{,}82 \lg h_{БС} - [45 - 6.55 \lg h_{БС}] \lg r, \quad \text{дБВт} \quad (8)$$

Потужність сигналу на вході приймача, виражена в ватах, може бути розрахована за формулою:

$$P_{прМС} = 10^{0{,}1 P_{перБС}} \cdot 10^{0{,}1 G_{БС}} \cdot 10^{-6{,}955} \cdot 10^{-2{,}616 \lg f_{ср}} \times \times 10^{1{,}382 \lg h_{БС}} \cdot 10^{-[45 - 6.55 \lg h_{БС}] \lg r}, \text{ Вт.} \quad (9)$$

Знаходимо Q-функцію [1] для ймовірності помилок 10^{-8} -10^{-2},визначаємо потужності сигналу на вході приймача МС при заданих значеннях висот антен БС ($h_{БС}$), коефіцієнтів підсилення антен БС ($G_{БС}$). Розраховуємо необхідні відстані r між БС та МС за формулою (9).

Технічні характеристики параметрів сигналу при швидкості передачі даних 10Мбіт/с (варіант 1) надані в таблиці 7.

Таблиця 7

Технічні характеристики параметрів сигналу при швидкості 10Мбіт/с, $G_{перБС}$=3.98 (варіант 1)

Ймовірність бітової помилки	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}
Потужність сигналу на вході приймача МС, дБВт	-120.7	-118.3	-116.6	-115.4	-114.48	-113.7	-113.036
Потужність сигналу на вході приймача МС, Вт	$8.5 \cdot 10^{-20}$	$14.9 \cdot 10^{-20}$	$21.7 \cdot 10^{-20}$	$28.7 \cdot 10^{-20}$	$35.6 \cdot 10^{-20}$	$42.6 \cdot 10^{-20}$	$49.7 \cdot 10^{-20}$
Потужність сигналу передавача БС, Вт	10	10	10	10	10	10	10
Висота антени БС, м	25	25	25	25	25	25	25
Відстань між БС та МС, км	1.3702	1.2353	1.1525	1.0945	1.0518	1.0175	0.989
Співвідношення сигнал/шум	2.68	4.72	6.87	9.08	11.27	13.48	15.73

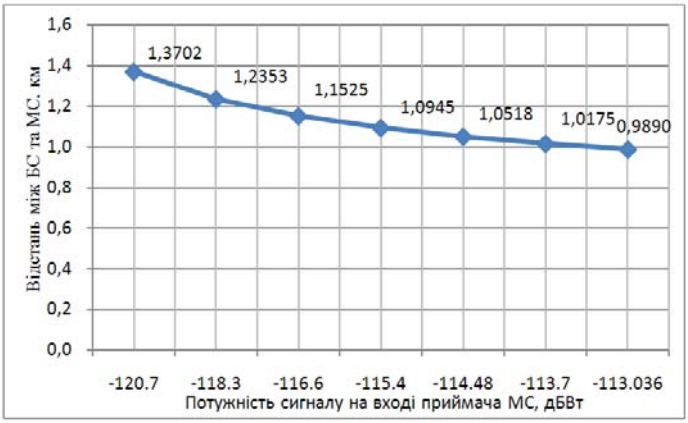


Рис. 4. Залежність значення відстані між БС та МС від потужності сигналу на вході приймача (варіант 1)

Таблиця 8

Технічні характеристики параметрів сигналу при швидкості 10Мбіт/с, $G_{перБС}$=15,8 (варіант 2)

Ймовірність бітової помилки	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}
Потужність сигналу на вході приймача МС, дБВт	-120.7	-118.3	-116.6	-115.4	-114.48	-113.7	-113.036
Потужність сигналу на вході приймача МС, Вт	$8.5 \cdot 10^{-20}$	$14.9 \cdot 10^{-20}$	$21.7 \cdot 10^{-20}$	$28.7 \cdot 10^{-20}$	$35.6 \cdot 10^{-20}$	$42.6 \cdot 10^{-20}$	$49.7 \cdot 10^{-20}$
Потужність сигналу передавача БС, Вт	30	30	30	30	30	30	30
Висота антени БС, м	25	25	25	25	25	25	25
Відстань між БС та МС, км	5.3009	4.779	4.4585	4.2342	4.069	3.9364	3.8259
Співвідношення сигнал/шум	2.68	4.72	6.87	9.08	11.27	13.48	15.73

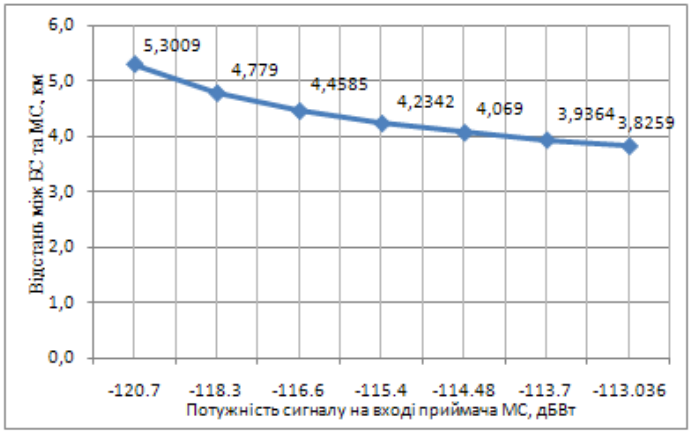


Рис. 5. Залежність значення відстані між БС та МС від потужності сигналу на вході приймача (варіант 2)

Таблиця 9

Технічні характеристики параметрів сигналу при швидкості 50Мбіт/с, $G_{перБС}$=3.98 (варіант 3)

Ймовірність бітової помилки	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}
Потужність сигналу на вході приймача МС, дБВт	-114.3	-111.6	-109.9	-108.6	-107.7	-106.8	-106.15
Потужність сигналу на вході приймача МС, Вт	$3.72\cdot10^{-12}$	$6.92\cdot10^{-12}$	$10.24\cdot10^{-12}$	$13.74\cdot10^{-12}$	$17.155\cdot10^{-12}$	$20.709\cdot10^{-12}$	$24.246\cdot10^{-12}$
Потужність сигналу передавача БС, Вт	10	10	10	10	10	10	10
Висота антени БС, м	25	25	25	25	25	25	25
Відстань між БС та МС, км	1.0433	0.9303	0.8654	0.8197	0.7864	0.7599	0.7381
Співвідношення сигнал/шум	2.35	4.38	6.48	8.69	10.86	13.11	15.35

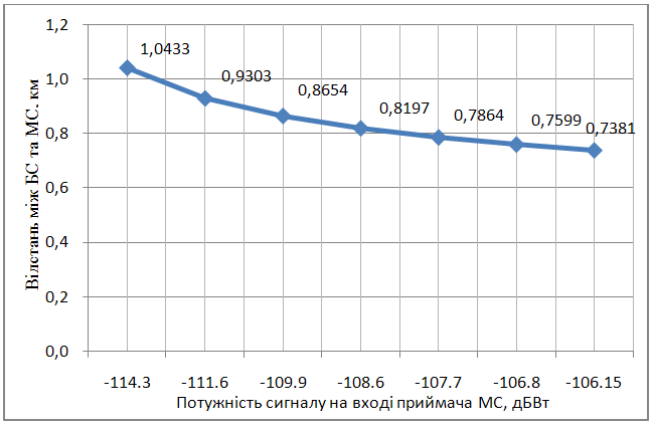


Рис. 6. Залежність значення відстані між БС та МС від потужності сигналу на вході приймача (варіант 3)

Таблиця 10

Технічні характеристики параметрів сигналу при швидкості 50Мбіт/с, $G_{перБС}$=15.8 (варіант 4)

Ймовірність бітової помилки	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}
Потужність сигналу на вході приймача МС, дБВт	-114.3	-111.6	-109.9	-108.6	-107.7	-106.8	-106.15
Потужність сигналу на вході приймача МС, Вт	$3.72\cdot10^{-12}$	$6.92\cdot10^{-12}$	$10.24\cdot10^{-12}$	$13.74\cdot10^{-12}$	$17.155\cdot10^{-12}$	$20.709\cdot10^{-12}$	$24.246\cdot10^{-12}$
Потужність сигналу передавача БС, Вт	30	30	30	30	30	30	30
Висота антени БС, м	25	25	25	25	25	25	25
Відстань між БС та МС, км	4.0361	3.5991	3.3481	3.1709	3.0436	2.9396	2.8552
Співвідношення сигнал/шум	2.35	4.38	6.48	8.69	10.86	13.11	15.35

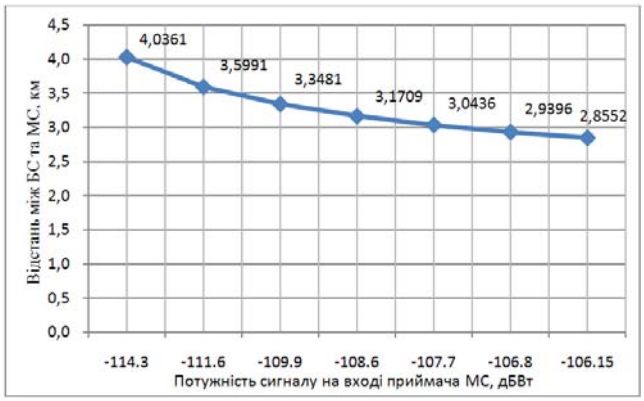


Рис. 7. Залежність значення відстані між БС та МС від потужності сигналу на вході приймача (варіант 4)

Таблиця 11

Технічні характеристики параметрів сигналу при швидкості 500Мбіт/с, $G_{перБС}$=3.98 (варіант 5)

Ймовірність бітової помилки	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}
Потужність сигналу на вході приймача МС, дБВт	-104.5	-101.7	-99.9	-98.7	-97.7	-96.9	-96.2
Потужність сигналу на вході приймача МС, Вт	$3.51\cdot10^{-11}$	$6.735\cdot10^{-11}$	$10.125\cdot10^{-11}$	$13.54\cdot10^{-11}$	$17.01\cdot10^{-11}$	$20.47\cdot10^{-11}$	$23.9\cdot10^{-11}$
Потужність сигналу передавача БС, Вт	10	10	10	10	10	10	10
Висота антени БС, м	25	25	25	25	25	25	25
Відстань між БС та МС, км	0.6891	0.6112	0.5668	0.5372	0.5151	0.4978	0.4837
Співвідношення сигнал/шум	2.22	4.26	6.4	8.57	10.77	12.95	15.13

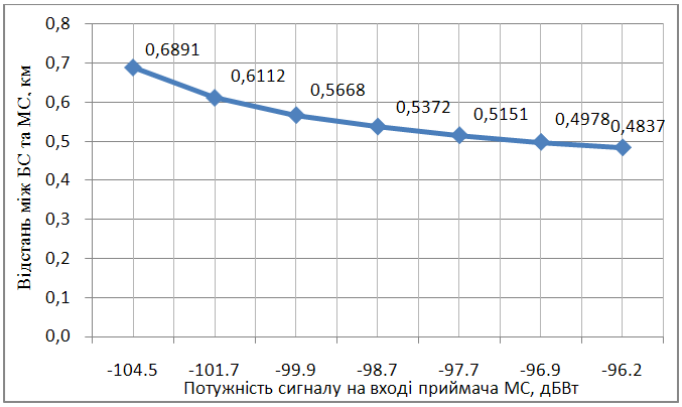


Рис. 8. Залежність значення відстані між БС та МС від потужності сигналу на вході приймача (варіант 5)

Таблиця 12

Технічні характеристики параметрів сигналу при швидкості 500Мбіт/с, $G_{перБС}$=15.8 (варіант 6)

Ймовірність бітової помилки	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}
Потужність сигналу на вході приймача МС, дБВт	-104.5	-101.7	-99.9	-98.7	-97.7	-96.9	-96.2
Потужність сигналу на вході приймача МС, Вт	$3.51\cdot10^{-11}$	$6.735\cdot10^{-11}$	$10.125\cdot10^{-11}$	$13.54\cdot10^{-11}$	$17.01\cdot10^{-11}$	$20.47\cdot10^{-11}$	$23.9\cdot10^{-11}$
Потужність сигналу передавача БС, Вт	30	30	30	30	30	30	30
Висота антени БС, м	25	25	25	25	25	25	25
Відстань між БС та МС, км	2.666	2.3644	2.1929	2.0783	1.9926	1.9256	1.8713
Співвідношення сигнал/шум	2.22	4.26	6.4	8.57	10.77	12.95	15.13

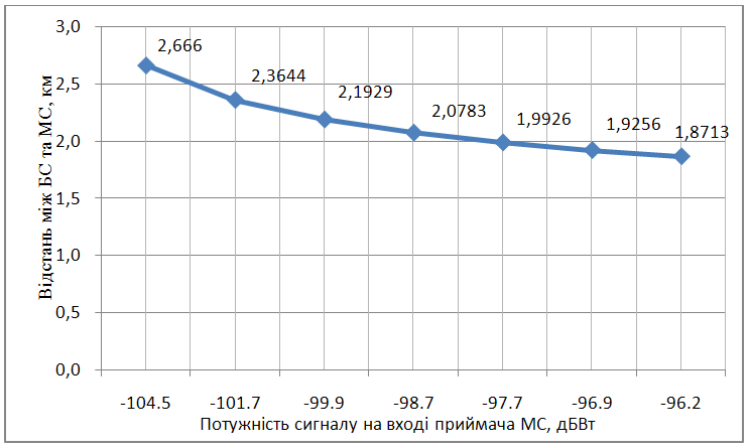


Рис. 9. Залежність значення відстані між БС та МС від потужності сигналу на вході приймача (варіант 6)

Висновки

По-перше, при швидкості передачі 10 Мбіт/с (варіант 1) при потужності сигналу на вході приймача МС від -113,036 дБВт до -115,4 дБВт, ймовірності бітових помилок від 10^{-8} до 10^{-5}, співвідношенні сигнал/шум від 15,73 до 9,08 при відповідних відстанях між БС та МС від 0,989 км до 1,0945 км, забезпечується висока якість мобільного зв'язку. При потужності сигналу на вході приймача МС -120,7 дБВт, ймовірність бітової помилки 10^{-2}, відстані між БС та МС 1,3702 км, співвідношення сигнал/шум складає 2,68 (при нормі 3,98 для системи CDMA), що є недопустимим і призведе до зриву радіозв'язку.

По-друге, при швидкості передачі 50 Мбіт/с (варіант 3) при потужності сигналу на вході приймача МС від -106,15 дБВт до -108,6 дБВт, ймовірності бітових помилок від 10^{-8} до 10^{-5}, співвідношенні сигнал/шум від 15,35 до 8,69, при відповідних відстанях між БС та МС від 0,7381 км до 0,8197 км забезпечується висока якість зв'язку.При потужності сигналу на вході приймача МС -114,3 дБВт, ймовірності бітової помилки 10^{-2}, відстані між БС та МС 1,0433 км, співвідношення сигнал/шум складає 2,35, що є недопустимим.

По-третє, при швидкості передачі 500 Мбіт/с (варіант 5) при потужності сигналу на вході приймача МС від -96,2 дБВт до -98,7 дБВт, ймовірності бітових помилок від 10^{-8} до 10^{-5}, співвідношенні сигнал/шум від 15,13 до 8,57 при відповідних відстанях між БС та МС від 0,4837 км до 0,5372 км забезпечується висока якість зв'язку. При потужності сигналу на вході приймача МС -104,5 дБВт, ймовірності помилки 10^{-2}, відстані між БС та МС 0,6891 км, співвідношення сигнал/шум приймає значення 2,22, що є недопустимим.

Надані науково обґрунтовані рекомендації щодо побудови розмірів комірок (r) системи CDMA в умовах забудови міста. Разом з тим на розміри комірок мереж мобільного зв'язку буде впливати очікувана максимальна кількість активних абонентів, що потребує подальших наукових досліджень.

Література

1. Сукачев Э.А. Сотовые сети радиосвязи с подвижными объектами : учеб. пособ. / Сукачев Э.А. – Одесса : ОНАС им. А.С. Попова, 2013. – С. 250–252.

2. Сукачев Э.А. Сотовые сети радиосвязи с подвижными объектами : учеб. пособ. / Сукачев Э.А. – Одесса : ОНАС им. А.С. Попова, 2013. – 157 с.

3. Карпова Л.В. Вплив швидкості передачі даних в системах мобільного зв'язку при відповідних співвідношеннях сигнал/шум на ймовірність бітової помилки та числа максимально активних абонентів / В.І. Лужанський, Л.В. Карпова, Ю.В. Маріїна // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2016. – № 6. – С. 146–157.

4. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра / Феер К. ; пер. с англ. ; под ред. В.И. Журавлева. – М. : Радио и связь, 2000. – 520 с.

References

1. Sukachev Je.A. Sotovye seti radiosvjazi s podvizhnymi obektami: ucheb. posob. / Sukachev Je.A. – Odessa: ONAS im. A.S. Popova, 2013. – 250-252 c.

2. Sukachev Je.A. Sotovye seti radiosvjazi s podvizhnymi obektami: ucheb. posob./ Sukachev Je.A.: – Odessa: ONAS im. A.S. Popova, 2013. – 157 s.

3. Karpova L.V. Vplyv shvydkosti peredachi danyh v systemah mobil'nogo zv'jazku pryvidpovidnyh spivvidnoshennjah sygnal/shum na jmovirnist' bitovoi' pomylky ta chysla maksymal'no aktyvnyh abonentiv / V.I. Luzhans'kyj, L.V. Karpova, Ju.V. Mari'i'na // Herald of Khmelnytskyi National University. – Hm., 2016. – Issue 6. – S. 146–157.

4. Feer K. Besprovodnaja cifrovaja svjaz'. Metody moduljacii i rasshirenij aspektra / Feer K.; per. s angl. podred. V.I. Zhuravleva. – M.: Radio i svjaz', 2000. – 520 s.

Рецензія/Peer review : 21.11.2017 р. Надрукована/Printed :06.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. В.В. Мартинюк

УДК 621.396.12

В.І. ЛУЖАНСЬКИЙ, Д.А. МАКАРИШКІН, М.Ю. НАРКЕВИЧ
Хмельницький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАВАДОВОЇ ОБСТАНОВКИ ПІД ЧАС РУХУ МОБІЛЬНОЇ СТАНЦІЇ ПРИ РІЗНИХ ПОТУЖНОСТЯХ ТА ВИСОТАХ АНТЕН БАЗОВИХ СТАНЦІЙ В УМОВАХ ЗАБУДОВИ МІСТА

Стаття присвячена дослідженню впливу зменшення внутрішньосистемних завад, які виникають внаслідок стільникової структури організації зони обслуговування, яка передбачає багаторазове використання одних і тих же частот. Для забезпечення високої завадостійкості мереж мобільного зв'язку необхідно за можливістю задавати технічні характеристики всіх базових станій однаковими. Якщо виконати ці вимоги неможливо за різних умов забудови міста, тоді необхідно зменшувати розміри стільників тих базових станцій, у яких співвідношення сигнал/завада є найгіршими для підвищення їх завадостійкості. Наводяться розрахункові формули для визначення відношення сигнал/завада.

Ключові слова: рухомий зв'язок, плоский регулярний гексагональний стільник , мобільна станція, базова станція, співвідношення сигнал/завада.

V.I. LUZHANSKY, D.A. MAKARYSHKIN, M.U. NARKEVYCH
Khmelnytskyi National University

INVESTIGATION OF INFLUENCE ON THE MOBILE STATION MOVEMENT IN DIFFERENT POWERS AND EXTENSIONS OF THE ANTEN IN CONDITIONS OF CITY PROTECTION

The application of cellular structures in the deployment of radio communication networks with mobile objects allows you to reuse the same allocated bandwidth to increase the speed of transfer of digital streams of information. Along with the obvious advantage of such an organization of mobile communication there is a very significant drawback, which is expressed in the presence of mutual interference between stations that use the same frequency spectrum. Such obstacles are called internal. The article is devoted to the investigation of the effect of reduction of intra-system noise that arises as a result of the cell structure of the organization of the service area, which involves multiple use of the same frequencies. One of the most important stages in the construction of the model of mobile networks of mobile radio is to determine the nature of the distribution of radio waves in the service area. To ensure high noise immunity of mobile networks, it is necessary to set the technical characteristics of all base stations as much as possible, if possible. If these requirements can not be fulfilled under different building conditions, then it is necessary to reduce the size of the cells of those base stations in which the signal/noise ratio is the worst to increase their noise immunity. The character of the change in the signal / noise ratio at the input of the receiver of the subscriber's mobile station at the selected points significantly depends on the number of base stations and their characteristics that create a barrier. At the same time, the coordinates of the placement of the mobile station play an important role. Calculation formulas are given to determine the signal/interference ratio.

Keywords: mobile communication, flat regular hexagonal cell, mobile station, base station, signal/noise ratio.

Вступ

Застосування стільникової структури при розгортанні мереж радіозв'язку з рухомими об'єктами дозволяє багаторазово використовувати одну і ту ж виділену смугу частот для збільшення швидкості передачі цифрових потоків інформації. Поряд з явною перевагою такої організації мобільного зв'язку є досить істотний її недолік, який виражається в наявності взаємних перешкод між станціями, які використовують однаковий частотний спектр. Подібні перешкоди названі внутрішньосистемними.

Аналіз стану досліджень та публікацій. Аналіз літературних джерел (наприклад, [1–5] та ін.) показує недостатністю глибину проведених досліджень у цьому напрямку.

Метою роботи є дослідження завадової обстановки при різних потужностях та висотах антен базових станцій під час руху мобільної станції в умовах забудови міста.

Результати дослідження. Під час проектування стільникових мереж рухомого радіозв'язку попередньо вибирають радіус R стільника і розмірність K кластера, а потім на карті міста викреслюють плоский регулярний гексагональний стільник, який покриває всю зону обслуговування [1, 4].

Кожна мобільна станція (МС) вільно переміщується по території обслуговування, в результаті чого рівні корисного сигналу і внутрішньосистемних перешкод від базових станцій (БС) на вході приймача абонента безперервно змінюються. Відношення сигнал/завада (С/З) можна розрахувати, якщо відомі технічні характеристики приймально-передавального обладнання, параметри траси і відстані від МС до передавача «своєї» базової станції $БС_0$, а також до джерел перешкод від передавачів $БС_1$, $БС_2$, $БС_3$, $БС_4$, $БС_5$, $БС_6$. Завдання стає повністю доцільним, якщо ввести афінну (косокутну) систему координат, яка адекватна для стільникової організації зони обслуговування.

Для дослідження динаміки завадової обстановки в конкретному стільнику його центр поєднують з початком косокутній системи координат точкою О таким чином, щоб осі координат Ох і Оу були перпендикулярні до суміжних сторін шестикутника. Кут між осями дорівнює 60°. Топологію мережі, що складається з семи стільників, ілюструє рис. 1.

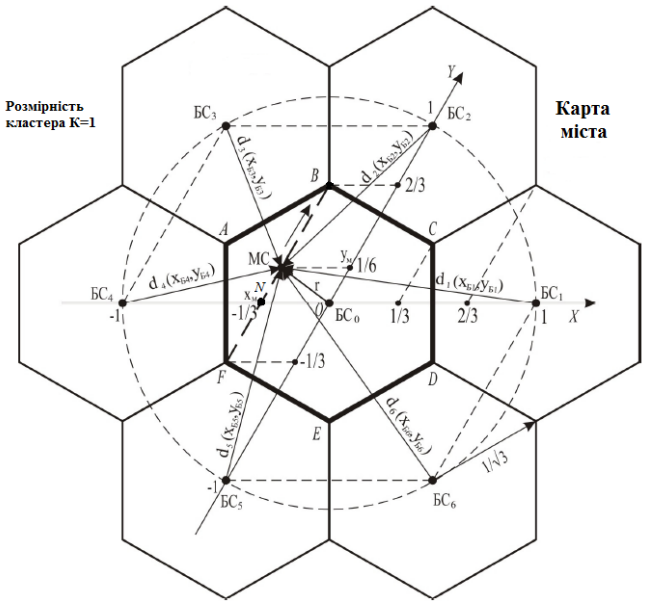


Рис. 1. Траєкторія руху мобільної станції по плоскому гексагональному стільнику

Розмірність кластера K = 1, коли кожен кластер складається з одного стільнику, що характерно для технології CDMA. Як одиниця масштабу в косокутній системі координат доцільно прийняти відстань H між центрами сусідніх стільників, рівне $R\sqrt{3}$. Для спрощення обчислень зазвичай вводять нормування, що передбачає ділення всіх відстаней на величину H. В такій нормованої системі координат радіус стільника $R_H = R/(R\sqrt{3}) = 1/3$. Для переходу до звичайних одиниць довжини потрібно буде відносну відстань помножити на $R\sqrt{3}$.

З урахуванням вказаного нормування координати кутових точок центральних стільників можуть бути записані наступним чином:

A(-2/3, 1/3), B(-1/3, 2/3), C(1/3, 1/3),
D(2/3, -1/3), E(1/3, -2/3), F(-1/3, -1/3).

У косокутній системі координат відстань між точками з координатами $A(x_A, y_A)$ і $B(x_B, y_B)$ визначається за формулою (1):

$$d(A,B) = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (x_A - x_B)\cdot(y_A - y_B) + (y_A - y_B)^2}. \quad (1)$$

Нехай $\{x_M; y_M\}$ і $\{0;0\}$ – координати відповідно МС і $БС_0$. Тоді відстань r між приймачем абонента і передавачем $БС_0$ в центральному стільнику на підставі формули (1) представляється у вигляді:

$$r = \sqrt{x_M^2 + x_M y_M + y_M^2}. \quad (2)$$

Крім корисного сигналу від $БС_0$ на вхід приймача МС надходять перешкоди від передавачів $БС_1$…$БС_6$., Розміщених у сусідніх кластерах. Відстань між $БС_i$, які створюють перешкоди, і приймачем абонента згідно з формулою (1) визначається так:

$$d_i(x_M, y_M; x_{Бі}, y_{Бі}) = \sqrt{(x_M - x_{БСi})^2 + (x_M - x_{БСi})\cdot(y_M - y_{БСi}) + (y_M - y_{БСi})^2} = \\ = \sqrt{K + r^2 - x_M(2x_{БСi} + y_M(x_{БСi} + 2y_{БСi})}, \quad i = 1,...,6, \quad (3)$$

де x_M, y_M – координати МС; К – розмірність кластера; r – відстань між МС і $БС_0$, визначається за формулою (2); $x_{БСi}, y_{БСi}$. – координати $БС_i$. в нормованої косокутній системі координат. Легко перевірити, що координати $БС_i$ пов'язані з розмірністю К кластера співвідношенням:

$$K = x_{Бі}^2 + x_{Бі} y_{Бі} + y_{Бі}^2, \quad i = 1,..,6.$$

Координати джерел завад $БС_i$ для різних значень кластера К представлені в таблиці 1.

Одним з найбільш відповідальних етапів побудови моделі стільникових мереж рухомого радіозв'язку є визначення характеру поширення радіохвиль в зоні обслуговування. Вона визначається рельєфом місцевості, висотою будівель, густотою забудови міста та іншими факторами. Зазвичай при обчисленнях користуються відомими співвідношеннями для вільного простору або двохвилевого поширення радіохвиль .

Потужність сигналу на вході приймача МС можна розрахувати, скориставшись наступним виразом (4):

$$P_{прМС} = \alpha_0 \cdot r^{-n}, \quad (4)$$

Таблиця 1

Координати БС$_i$, які створюють завади МС на співпадаючих частотах

Базова станція	К=1		К=3		К=4		К=7	
	$x_{Бі}$	$y_{Бі}$	$x_{Бі}$	$y_{Бі}$	$x_{Бі}$	$y_{Бі}$	$x_{Бі}$	$y_{Бі}$
БС$_1$	1	0	1	1	2	0	2	1
БС$_2$	0	1	-1	2	0	2	-1	3
БС$_3$	-1	1	-2	1	-2	2	-3	2
БС$_4$	-1	0	-1	-1	-2	0	-2	-1
БС$_5$	0	-1	1	2	0	-2	1	-3
БС$_6$	1	-1	2	-1	2	-2	3	-2

де α_0 – коефіцієнт пропорційності, що залежить від технічних характеристик приймально-передаючого обладнання МС і БС$_0$, $\alpha_0 = P_{перБС_0} G_1 G_2 (h_1 h_2)^2$; $P_{перБС_0}$ - потужність на виході передавача БС$_0$; $G_1 G_2$ – коефіцієнти підсилення антен відповідно БС$_0$ і МС; r - відстань між МС і БС$_0$, залежна від координат МС; n – показник ослаблення сигналу, що враховує ослабленість траси.

Показник загасання радіохвиль в (4) набуває таких значень: n = 2 – у вільному просторі; n = 4 – при поширенні над поверхнею землі (двопроменева модель). Можна показати [4], що в моделі Окамури-Хати для типових значень параметрів мережі цей показник теж близький до n = 4. У подальших розрахунках будемо вважати, що умови поширення для сигналів і перешкод однакові і n = 4.

По прикладу з формули (4) потужність внутрішньосистемних завад на вході приймача МС від *i*-ї БС визначається наступним чином:

$$P_{ПБі} = \alpha_i \cdot d_i^{-4}(x_M, y_M; x_{БС_i}, y_{БС_i}), \quad i = 1,..,6, \tag{5}$$

де α_i – нормуючий коефіцієнт для *i*-го направлення.

Тоді відношення С/З на вході приймача абонента можна записати як:

$$\rho^2(x_M) = \sum_{i=1}^{N} \frac{P_{прМС}(x_M)}{P_{ПБі}(x_M, y_M; x_{БС_i}, y_{БС_i})}), \quad N = 1,2,...,6. \tag{6}$$

Підставляємо формули (4) і (5) в (6). Що дає змогу переписати вираз (6) у вигляді:

$$\rho^2(x_M) = \sum_{i=1}^{N} \frac{\alpha_0 \cdot r^{-4}(x_M)}{\alpha_i \cdot d^{-4}(x_M, y_M; x_{БС_i}, y_{БС_i})}), \quad N = 1,2,...,6. \tag{7}$$

У випадку коли α_0 та α_i – коефіцієнти пропорційності, які залежать від технічних характеристик приймально-передавального обладнання МС і БС$_0$ будуть однаковими між собою, тобто $\alpha_0 = \alpha_1 ... \alpha_6$, то в даному випадку можна вираз (7) записати у вигляді:

$$\rho^2(x_M) = \sum_{i=1}^{N} \frac{r^{-4}(x_M)}{d^{-4}(x_M, y_M; x_{БС_i}, y_{БС_i})}), \quad N = 1,2,...,6. \tag{8}$$

В наших розрахунках представимо дві координати знаходження мобільної станції в точках М, В з їх координатами М(-1/3, 1/6) та В(-1/3, 2/3), які представлені на рисунку 1. Також для кожної координати проведемо розрахунки по трьом варіантам. Перший варіант з однаковими технічними характеристиками приймально-передавальних пристроїв, другий варіант представляє центральну БС з найменшою потужністю і найменшою висотою антени, а третій з найбільшою потужністю і найбільшою висотою антени. Всі розрахунки ми будем проводити для технології CDMA.

Таблиця 2

Технічні характеристики варіанту 1

Базові станції	$P_{перБС}$, Вт	G_1, дБ	G_2, дБ	h_1, м	h_2, м
БС$_0$,БС$_1$…БС$_6$	10	6 (3,98 раз)	2 (1,58 раз)	25	1,5

Тоді α_0 буде мати такий вигляд:

$$\alpha_0 = P_{перБС_0} G_1 G_2 (h_1 h_2)^2 = 10 \cdot 3{,}98 \cdot 1{,}58 \cdot (25 \cdot 1{,}5)^2 = 8843.$$

Розрахуємо відстань r від точки М, де знаходиться МС до точки О (центру базової станції):

$$r = \sqrt{x_M^2 + x_M y_M + y_M^2} = \sqrt{(-1/3)^2 + (-1/3) \cdot 1/6 + 1/6^2} = 0{,}289, км.$$

У нашому випадку ми враховуємо завади від всіх шести сусідніх базових станцій, як показано на рисунку 1, а координати базових станцій представлені в таблиці 1 для розмірності кластера К=1.

$$d_1(M, БС_1) = \sqrt{(x_M - x_{БС_1})^2 + (x_M - x_{БС_1}) \cdot (y_M - y_{БС_1}) + (y_M - y_{БС_1})^2} =$$
$$= \sqrt{((-1/3) - 1)^2 + (-1/3) - 1) \cdot (1/6 - 0) + (1/6 - 0)^2} = 1{,}258 км.$$
$$d_2(M, БС_2) = \sqrt{(x_M - x_{БС_2})^2 + (x_M - x_{БС_2}) \cdot (y_M - y_{БС_2}) + (y_M - y_{БС_2})^2} =$$
$$= \sqrt{((-1/3) - 0)^2 + (-1/3) - 0) \cdot (1/6 - 1) + (1/6 - 1)^2} = 1{,}041 км.$$
$$d_3(M, БС_3) = \sqrt{(x_M - x_{БС_3})^2 + (x_M - x_{БС_3}) \cdot (y_M - y_{БС_3}) + (y_M - y_{БС_3})^2} =$$
$$= \sqrt{((-1/3) - (-1))^2 + (-1/3) - (-1)) \cdot (1/6 - 1) + (1/6 - 1)^2} = 0{,}764 км.$$
$$d_4(M, БС_4) = \sqrt{(x_M - x_{БС_4})^2 + (x_M - x_{БС_4}) \cdot (y_M - y_{БС_4}) + (y_M - y_{БС_4})^2} =$$
$$= \sqrt{((-1/3) - (-1))^2 + (-1/3) - (-1)) \cdot (1/6 - 0) + (1/6 - 0)^2} = 0{,}764 км.$$
$$d_5(M, БС_5) = \sqrt{(x_M - x_{БС_5})^2 + (x_M - x_{БС_5}) \cdot (y_M - y_{БС_5}) + (y_M - y_{БС_5})^2} =$$
$$= \sqrt{((-1/3) - 0)^2 + (-1/3) - 0) \cdot (1/6 - (-1)) + (1/6 - (-1))^2} = 1{,}041 км.$$
$$d_6(M, БС_6) = \sqrt{(x_M - x_{БС_6})^2 + (x_M - x_{БС_6}) \cdot (y_M - y_{БС_6}) + (y_M - y_{БС_6})^2} =$$
$$= \sqrt{((-1/3) - 1)^2 + (-1/3) - 1) \cdot (1/6 - (-1)) + (1/6 - (-1))^2} = 1{,}258 км.$$

Тоді відношення С/З на вході приймача абонента в точці М від шести сусідніх БС можна записати як:

$$\rho^2(x_M) = \sum_{i=1}^{N} \frac{r^{-4}(x_M)}{d^{-4}(x_M, y_M; x_{БС_i}, y_{БС_i})} =$$
$$= \frac{(0{,}289)^{-4}}{(1{,}258)^{-4} + (1{,}041)^{-4} + (0{,}764)^{-4} + (0{,}764)^{-4} + (1{,}041)^{-4} + (1{,}258)^{-4}} = 33{,}838.$$

В точці М співвідношення сигнал/завада на вході приймача МС дорівнює 33,838, тобто вище чим 6-7 дБ (3,98-5 раз) від мінімальної потреби співвідношення С/З на вході приймача МС.

Хотілось би зауважити що в наших розрахунках висоти антен базових станцій та їх потужністості змінюються в умовах забудови міста, в розрахунку на різні висоти будівель та розміри стільників, які в свою чергу залежать від кількості абонентів в зоні. Змінимо потужність та висоти сусідніх базових станцій, значення яких наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

Технічні характеристики варіанту 2

Базові станції	$P_{перБС}$, Вт	G_1, дБ	G_2, дБ	h_1, м	h_2, м
$БС_0$	15	6 (3,98 раз)	2 (1,58 раз)	25	1,5
$БС_1$	25			30	
$БС_2$	20			35	
$БС_3$	20			40	
$БС_4$	25			45	
$БС_5$	30			50	
$БС_6$	35			55	

Тоді α_0 буде мати такий вигляд:

$$\alpha_0 = P_{перБС_0} G_1 G_2 (h_1 h_2)^2 = 15 \cdot 3{,}98 \cdot 1{,}58 \cdot (25 \cdot 1{,}5)^2 = 132600 Вт \cdot м^4.$$

Підставляємо з таблиці 3 дані для розрахунку інших коефіцієнтів.

$$\alpha_1 = P_{перБС_0} G_1 G_2 (h_1 h_2)^2 = 25 \cdot 3{,}98 \cdot 1{,}58 \cdot (30 \cdot 1{,}5)^2 = 318400 Вт \cdot м^4.$$
$$\alpha_2 = P_{перБС_0} G_1 G_2 (h_1 h_2)^2 = 20 \cdot 3{,}98 \cdot 1{,}58 \cdot (35 \cdot 1{,}5)^2 = 346600 Вт \cdot м^4.$$
$$\alpha_3 = P_{перБС_0} G_1 G_2 (h_1 h_2)^2 = 20 \cdot 3{,}98 \cdot 1{,}58 \cdot (40 \cdot 1{,}5)^2 = 452800 Вт \cdot м^4.$$
$$\alpha_4 = P_{перБС_0} G_1 G_2 (h_1 h_2)^2 = 25 \cdot 3{,}98 \cdot 1{,}58 \cdot (45 \cdot 1{,}5)^2 = 716300 Вт \cdot м^4.$$
$$\alpha_5 = P_{перБС_0} G_1 G_2 (h_1 h_2)^2 = 30 \cdot 3{,}98 \cdot 1{,}58 \cdot (50 \cdot 1{,}5)^2 = 1061000 Вт \cdot м^4.$$

$$\alpha_6 = P_{перБС_0} G_1 G_2 (h_1 h_2)^2 = 35 \cdot 3{,}98 \cdot 1{,}58 \cdot (55 \cdot 1{,}5)^2 = 1498000 Вт \cdot м^4.$$

Але технічні характеристики у БС у другого варіанту різні, тому розрахунок співвідношення сигнал/завада проводимо в залежності від параметрів технічних характеристик.

В наших розрахунках представимо знаходження мобільної станції в точках М та В з їх координатами М(-1/3, 1/6), В(-1/3, 2/3), які представлені на рисунку 1.

Відстань r від точки М до точки О (центру базової станції), де знаходиться мобільна станція, та відстані від мобільної станції до сусідніх БС, є однаковими з першим варіантом, так як координати МС не змінювалися:

$$r = 0.289км,\ d_1(M, БС_1) = 1{,}258км,\ d_2(M, БС_2) = 1{,}041км,\ d_3(M, БС_3) = 0{,}764км,$$
$$d_4(M, БС_4) = 0{,}764км,\ d_5(M, БС_5) = 1{,}041км,\ d_6(M, БС_6) = 1{,}258, км.$$

Тоді відношення С/З на вході приймача абонента в точці М від шести сусідніх БС з різними технічними характеристиками можна записати як:

$$\rho^2(x_M) = \sum_{i=1}^{N} \frac{\alpha_0 \cdot r^{-4}(x_M)}{\alpha_i \cdot d^{-4}(x_M, y_M; x_{БС_i}, y_{БС_i})} =$$

$$= \frac{132600 \cdot (0{,}289)^{-4}}{318400 \cdot (1{,}258)^{-4} + 346600 \cdot (1{,}041)^{-4} + 452800 \cdot (0{,}764)^{-4} + 716300 \cdot (0{,}764)^{-4} + 1061000 \cdot (1{,}041)^{-4} + 1498000 \cdot (1{,}258)^{-4}} = 14{,}772$$

В точці М співвідношення сигнал/завада на вході приймача МС при різних характеристиках БС дорівнює 14,772.

Третій варіант з різними технічними характеристиками БС залежно від забудови міста надано в таблиці 4.

Таблиця 4

Технічні характеристики варіанту 3

Базові станції	$P_{перБС}$, Вт	G_1, дБ	G_2, дБ	h_1, м	h_2, м
$БС_0$	35	6 (3,98 раз)	2 (1,58 раз)	55	1,5
$БС_1$	20			50	
$БС_2$	25			45	
$БС_3$	30			40	
$БС_4$	30			35	
$БС_5$	25			30	
$БС_6$	30			25	

Тоді α_0 буде мати такий вигляд:

$$\alpha_0 = P_{перБС_0} G_1 G_2 (h_1 h_2)^2 = 35 \cdot 3{,}98 \cdot 1{,}58 \cdot (55 \cdot 1{,}5)^2 = 1498000 Вт \cdot м^4.$$

Підставляємо з таблиці 3 дані для розрахунку коефіцієнтів $\alpha_1 ... \alpha_6$:

$$\alpha_1 = P_{перБС_0} G_1 G_2 (h_1 h_2)^2 = 20 \cdot 3{,}98 \cdot 1{,}58 \cdot (50 \cdot 1{,}5)^2 = 707400 Вт \cdot м^4.$$

$$\alpha_2 = P_{перБС_0} G_1 G_2 (h_1 h_2)^2 = 25 \cdot 3{,}98 \cdot 1{,}58 \cdot (45 \cdot 1{,}5)^2 = 716300 Вт \cdot м^4.$$

$$\alpha_3 = P_{перБС_0} G_1 G_2 (h_1 h_2)^2 = 30 \cdot 3{,}98 \cdot 1{,}58 \cdot (40 \cdot 1{,}5)^2 = 679100 Вт \cdot м^4.$$

$$\alpha_4 = P_{перБС_0} G_1 G_2 (h_1 h_2)^2 = 30 \cdot 3{,}98 \cdot 1{,}58 \cdot (35 \cdot 1{,}5)^2 = 520000 Вт \cdot м^4.$$

$$\alpha_5 = P_{перБС_0} G_1 G_2 (h_1 h_2)^2 = 25 \cdot 3{,}98 \cdot 1{,}58 \cdot (30 \cdot 1{,}5)^2 = 318400 Вт \cdot м^4.$$

$$\alpha_6 = P_{перБС_0} G_1 G_2 (h_1 h_2)^2 = 30 \cdot 3{,}98 \cdot 1{,}58 \cdot (25 \cdot 1{,}5)^2 = 265300 Вт \cdot м^4..$$

Технічні характеристики у БС третього варіанту різні, тому ми їх розраховуємо і в співвідношення сигнал/завада обов'язково включаємо, щоб дослідити залежність параметрів технічних характеристик, коли потужність та висота центральної БС найбільші .

Відстань r від точки М до точки О, центру базової станції де знаходиться мобільна станція, та відстані від мобільної станції до сусідніх БС однакові, тому результати візьмемо з варіанту 1:

$$r = 0{,}289км,\ d_1(M, БС_1) = 1{,}258км,\ d_2(M, БС_2) = 1{,}041км,\ d_3(M, БС_3) = 0{,}764км,\ d_4(M, БС_4) = 0{,}764км,$$
$$d_5(M, БС_5) = 1{,}041км,\ d_6(M, БС_6) = 1{,}258км.$$

Тоді відношення С/З на вході приймача абонента в точці М від шести сусідніх БС з різними технічними характеристиками можна записати як:

$$\rho^2(x_M)=\sum_{i=1}^{N}\frac{\alpha_0\cdot r^{-4}(x_M)}{\alpha_i\cdot d^{-4}(x_M,y_M;x_{БС_i},y_{БС_i})}=$$

$$=\frac{1498000\cdot(0{,}289)^{-4}}{707400\cdot(1{,}258)^{-4}+716300\cdot(1{,}041)^{-4}+679100\cdot(0{,}764)^{-4}+520000\cdot(0{,}764)^{-4}+318400\cdot(1{,}041)^{-4}+265300\cdot(1{,}258)^{-4}}=52{,}801$$

В точці М співвідношення сигнал/завада на вході приймача МС при різних характеристик БС, коли потужність найбільша і антена найвища $БС_0$ дорівнює 52,801.

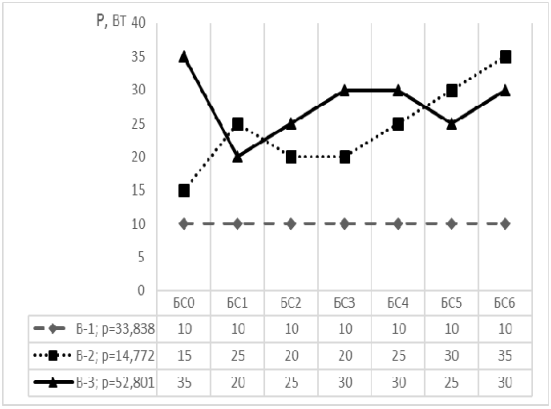


Рис. 2. Залежність потужностей базових станцій та співвідношення сигнал/завада для трьох варіантів точки М

На рис. 2 описується залежність впливу потужностей базових станцій на співвідношення сигнал/завада на вході приймача МС (для точки М), що дає змогу наглядно побачити, що чим більша потужність сигналу сусідніх БС тим гірше співвідношення сигнал/завада, і навпаки, коли потужність $БС_0$ =35 Вт, а всіх інших БС нижча, то співвідношення с/з в кілька перевищує мінімум для технології CDMA.

Розрахуємо відстань r від точки В (-1/3;2/3) до точки О (0;0), центру базової станції, де знаходиться мобільна станція у самій віддаленій точці.

$$r=\sqrt{x_B^2+x_By_B+y_B^2}=\sqrt{(-1/3)^2+(-1/3)\cdot 2/3+2/3^2}=0{,}577,км.$$

У нашому випадку ми враховуємо завади від всіх шести сусідніх базових станцій, як показано на рисунку 1, а координати базових станцій представлені в таблиці 1, для розмірності кластера К=1.

$$d_1(B,БС_1)=\sqrt{(x_B-x_{БС_1})^2+(x_B-x_{БС_1})\cdot(y_B-y_{БС_1})+(y_B-y_{БС_1})^2}=$$
$$=\sqrt{((-1/3)-1)^2+((-1/3)-1)\cdot(2/3-0)+(2/3-0)^2}=1{,}155км,$$
$$d_2(B,БС_2)=\sqrt{(x_B-x_{БС_2})^2+(x_B-x_{БС_2})\cdot(y_B-y_{БС_2})+(y_B-y_{БС_2})^2}=$$
$$=\sqrt{((-1/3)-0)^2+((-1/3)-0)\cdot(2/3-1)+(2/3-1)^2}=0{,}577км.$$
$$d_3(B,БС_3)=\sqrt{(x_B-x_{БС_3})^2+(x_B-x_{БС_3})\cdot(y_B-y_{БС_3})+(y_B-y_{БС_3})^2}=$$
$$=\sqrt{((-1/3)-(-1))^2+((-1/3)-(-1))\cdot(2/3-1)+(2/3-1)^2}=0{,}577км.$$
$$d_4(B,БС_4)=\sqrt{(x_B-x_{БС_4})^2+(x_B-x_{БС_4})\cdot(y_B-y_{БС_4})+(y_B-y_{БС_4})^2}=$$
$$=\sqrt{((-1/3)-(-1))^2+((-1/3)-(-1))\cdot(2/3-0)+(2/3-0)^2}=1{,}155км.$$
$$d_5(B,БС_5)=\sqrt{(x_B-x_{БС_5})^2+(x_B-x_{БС_5})\cdot(y_B-y_{БС_5})+(y_B-y_{БС_5})^2}=$$
$$=\sqrt{((-1/3)-0)^2+((-1/3)-0)\cdot(2/3-(-1))+(2/3-(-1))^2}=1{,}528км.$$
$$d_6(B,БС_6)=\sqrt{(x_B-x_{БС_6})^2+(x_B-x_{БС_6})\cdot(y_B-y_{БС_6})+(y_B-y_{БС_6})^2}=$$
$$=\sqrt{((-1/3)-1)^2+((-1/30-1)\cdot(2/3-(-1))+(2/3-(-1))^2}=1{,}528км.$$

Тоді відношення С/З на вході приймача абонента в точці В від шести сусідніх БС можна записати як:

$$\rho^2(x_B)=\sum_{i=1}^{N}\frac{r^{-4}(x_B)}{d^{-4}(x_B,y_B;x_{БС_i},y_{БС_i})}=$$

$$= \frac{(0{,}577)^{-4}}{(1{,}155)^{-4} + (0{,}577)^{-4} + (0{,}577)^{-4} + (1{,}155)^{-4} + (1{,}528)^{-4} + (1{,}528)^{-4}} = 10{,}198.$$

Для другого варіанту точки В технічні характеристики БС візьмемо з таблиці 3.

Тоді $\alpha_0, \alpha_1 ... \alpha_6$ буде мати такий вигляд як і в другому варіанті для точки М:

Відстань r від точки В до точки О є однаковими з першим варіантом для точки М, тому в подальших розрахунках будемо використовуватимемо вже готові результати:

$r = 0{,}577 км$, $d_1(B, БС_1) = 1{,}155 км$, $d_2(B, БС_2) = 0{,}577 км$, $d_3(B, БС_3) = 0{,}577 км$, $d_4(B, БС_4) = 1{,}155 км$, $d_5(B, БС_5) = 1{,}528 км$, $d_6(B, БС_6) = 1{,}528 км$.

Тоді відношення С/З на вході приймача абонента в точці В від шести сусідніх БС з різними технічними характеристиками, можна записати як:

$$\rho^2(x_B) = \sum_{i=1}^{N} \frac{\alpha_0 \cdot r^{-4}(x_B)}{\alpha_i \cdot d^{-4}(x_B, y_B; x_{БС_i}, y_{БС_i})} =$$

$$= \frac{132600 \cdot (0{,}577)^{-4}}{318400 \cdot (1{,}155)^{-4} + 346600 \cdot (0{,}577)^{-4} + 452800 \cdot (0{,}577)^{-4} + 716300 \cdot (1{,}155)^{-4} + 1061000 \cdot (1{,}528)^{-4} + 1498000 \cdot (1{,}528)^{-4}} = 4{,}06 \cdot$$

В точці В співвідношення сигнал/завада на вході приймача МС при різних характеристиках БС дорівнює 4,06, тобто є наближене до мінімального порогового рівня потужності на вході приймача МС, що вразі зменшення співвідношення с/з може призвести до зриву зв'язку.

Для третього варіанту точки В дані беремо з таблиці 4.

Також обов'язково включаємо коефіцієнт пропорційності $\alpha_0, \alpha_1 ... \alpha_6$, щоб дослідити залежність зміни параметрів технічних характеристик БС:

$\alpha_0 = 14980000$, $\alpha_1 == 707400$, $\alpha_2 = 716300$, $\alpha_3 = 679100$, $\alpha_4 = 520000$, $\alpha_5 = 318400$, $\alpha_6 = 265300$. .

Відстань r від точки В, де знаходиться мобільна станція, до точки О, центру базової станції, та відстані від мобільної станції до сусідніх БС, результати візьмемо з варіанту 1 для точки В:

$r = 0{,}577 км$, $d_1(B, БС_1) = 1{,}155 км$, $d_2(B, БС_2) = 0{,}577 км$, $d_3(B, БС_3) = 0{,}577 км$, $d_4(B, БС_4) = 1{,}155 км$, $d_5(B, БС_5) = 1{,}528 км$, $d_6(B, БС_6) = 1{,}528 км$.

Тоді відношення С/З на вході приймача абонента в точці В від шести сусідніх БС з різними технічними характеристиками, коли $БС_0$ матиме найбільшу потужність та найбільшу висоту антени, можна записати як:

$$\rho^2(x_B) = \sum_{i=1}^{N} \frac{\alpha_0 \cdot r^{-4}(x_B)}{\alpha_i \cdot d^{-4}(x_B, y_B; x_{БС_i}, y_{БС_i})} =$$

$$= \frac{1498000 \cdot (0{,}577)^{-4}}{707400 \cdot (1{,}155)^{-4} + 716300 \cdot (0{,}577)^{-4} + 679100 \cdot (0{,}577)^{-4} + 520000 \cdot (1{,}155)^{-4} + 318400 \cdot (1{,}528)^{-4} + 265300 \cdot (1{,}528)^{-4}} = 12{,}92 \cdot$$

В точці В співвідношення сигнал/завада на вході приймача МС дорівнює 12,92, тобто вища ніж 6-7 дБ (3,98-5 раз), що є мінімальною потребою для необхідного відношення співвідношення с/з на вході приймача МС.

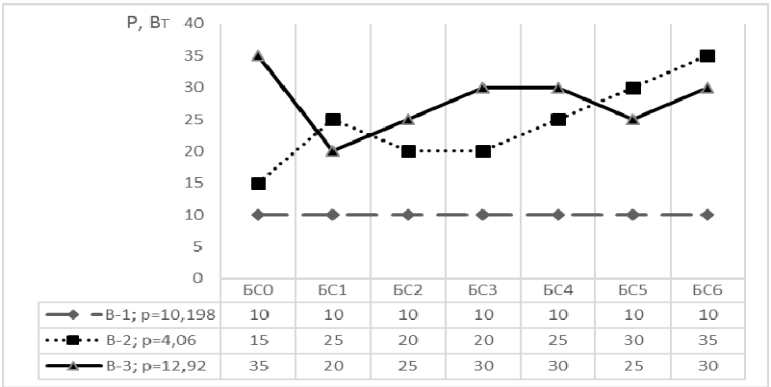


Рис. 3. Залежність потужностей базових станцій та співвідношення сигнал/завада для трьох варіантів точки В

На рис. 3 описується залежність С/З від потужностей базових станцій для точки В, що дає змогу наглядно побачити, що чим більша потужність сигналу сусідніх БС, тим гірше співвідношення сигнал/завада, як у другому варіанті.

Висновки

Підсумовуючи результати дослідження, приходимо до наступних висновків.

1. Характер зміни співвідношення С/З на вході приймача МС абонента при обраних точках М та В

істотно залежить від кількості БС та їх характеристик, які створюють завади. При цьому вагому роль відіграють координати розміщення МС, тобто відстані між МС і $БС_0$, $БС_1$, $БС_2$, $БС_3$, $БС_4$, $БС_5$, $БС_6$.

2. При збільшенні числа одночасно діючих джерел завад значення функції $\rho^2(x)$ зменшується за рахунок того, що потужність сигналу на вході приймача МС ділиться на суму потужностей передавачів сусідніх БС. При чому чим більше БС, тим співвідношення с/з погіршується.

3. Співвідношення сигнал/завада на вході приймач МС за умов, коли технічні характеристики всіх БС ($БС_0$, …$БС_6$) однакові (перший варіант), складає: в точці М значення функції $\rho^2(x_M) = 33{,}838$ ($r = 0{,}289км$); в точці В значення функції $\rho^2(x_B) = 10{,}198$ ($r = 0{,}577км$).

4. Співвідношення сигнал/завада на вході приймач МС істотно змінюється, коли МС знаходиться на різних відстанях від центральної $БС_0$. Чим ближче МС до $БС_0$, тим краще співвідношення сигнал/завада. Так, для другого варіанту, коли центральна $БС_0$ має найменшу потужність (15Вт) і найменшу висоту антени (25м), для точки М значення функції $\rho^2(x_M) = 14{,}772$ ($r = 0{,}289км$); для точки В значення функції $\rho^2(x_B) = 4{,}06$ ($r = 0{,}577км$).

5. Співвідношення сигнал/завада має максимальні значення на вході приймача МС для третього варіанту, коли центральна $БС_0$ має найбільшу потужність (35Вт) і найбільшу висоту антени (55 м): для точки М значення функції $\rho^2(x_M) = 52{,}801$ ($r = 0{,}289км$); для точки В значення функції $\rho^2(x_B) = 12{,}92$ ($r = 0{,}577км$).

6. Для забезпечення високої завадостійкості мереж мобільного зв'язку стандарту CDMA необхідно по можливості задавати технічні характеристики всіх БС однаковими. Якщо виконати ці вимоги неможливо при різних умовах забудови міста, тоді необхідно зменшувати розміри стільників тих БС, у яких співвідношення с/з є найгіршими для підвищення їх завадостійкості.

Література

1. Поспелова А. О. Розвиток методів підвищення ефективності стільникових систем радіозв'язку з рухомими об'єктами / Поспелова А. О. – 2017. – 20 с.

2. Сукачев Э.А. Сотовые сети радиосвязи с подвижными объектами : учеб. пособ. / Сукачев Э.А. – [3-е изд., перераб. и дополн.]. – Одесса : ОНАС им. А.С. Попова, 2013. – 256 с.

3. Сукачев Э.А. Сотовые сети радиосвязи с подвижными объектами : учеб. пособ. / Сукачев Э.А. – [2-е изд., испр. и доп.]. – Одесса : УГАС им. А.С. Попова, 2000. – 119 с.

4. Ратынский М.В. Основы сотовой связи / Ратынский М.В. – М. : Радио и связь, 2000. – 248 с.

5. Системы мобильной связи: учеб. пособ. для вузов / [Ипатов В.П., Орлов В.И., Самойлов И.М. и др.]. – М. : Горячая линия – Телеком, 2003. – 272 с.

References

1. Pospelova A. O. Avtoreferat. Rozvytok metodiv pidvyshhennja efektyvnosti stil'nykovyh system radiozv'jazku z ruhomymy ob'jektamy. 2017. – 20 s.

2. Sukachev Je.A. Sotovye seti radiosvjazi s podvizhnymi obektami: ucheb. posob. / Sukachev Je.A. – [3-e izd., pererab. i dopoln.]. – Odessa: ONAS im. A.S. Popova, 2013. – 256 c.

3. Sukachev Je.A. Sotovye seti radiosvjazi s podvizhnymi obektami: ucheb. posob. / Sukachev Je.A.: [2-e izd., ispr. i dop.]. – Odessa: UGAS im. A.S. Popova, 2000. – 119 s.

4. Ratynskij M.V. Osnovy sotovoj svjazi / Ratynskij M.V. – M.: Radio i svjaz', 2000. – 248 s.

5. Sistemy mobil'noj svjazi: ucheb. posob. dlja vuzov / [Ipatov V.P., Orlov V.I., Samojlov I.M. i dr.]. – M.: Gorjachaja linija – Telekom, 2003. – 272 s.

Рецензія/Peer review : 16.11.2017 р. Надрукована/Printed :03.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. В.В. Мартинюк

УДК 621.373.1

І.В. ГУЛА, Л.В. КАРПОВА, Л.О. КОВТУН, О.І. ПОЛІКАРОВСЬКИХ
Хмельницький національний університет

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИНТЕЗАТОРІВ DDS

Розглянуто методи підвищення якості спектральних характеристик прямих цифрових синтезаторів частоти – DDS. Виконано аналіз виникнення шумів у синтезаторах цього типу. Розглянуто методи для зменшення спектральної густини потужності фазового шуму вихідного спектру прямого цифрового синтезу. Застосування запропонованих методів зменшення спектральної густини потужності фазового шуму дозволить використовувати синтезатори DDS типу у більш широкому спектрі застосувань і з підвищеними вимогами до рівнів фазових шумів.

Ключові слова: АЦП, ЦАП, прямий синтезатор частоти.

I.V. HULA, L.V. KARPOVA, L.O. KOVTUN, O.I. POLIKAROVSKYKH
Khmelnytsky National University

METHODS OF THE QUALITY INCREASING OF SPECTRAL CHARACTERISTICS IN DIRECT DIGITAL SYNTHESIZER

Methods of improving the quality of the spectral characteristics of direct digital synthesizers - DDS are considered. An analysis of the noise in the synthesizers of this type is performed. Principles of the organization of direct digital synthesizers of frequency are considered. The main sources of errors occurring in such synthesizers are analyzed. A mathematical analysis of the functioning of the main elements of such a synthesizer in terms of minimization of phase noise is performed. The methods for reducing the spectral density of the phase noise power of the output spectrum of direct digital synthesis are considered. Generalized application of various methods for reduction of the general level of amplitude and phase noise, and absolute levels of side components of the main synthesized signal. Therefore, the application of these methods and structures of digital synthesizers of direct synthesis of DDS on their basis greatly improves the noise characteristics of synthesizers, but complicates their internal structure. The proposed methods and structures of DDS synthesizers can be used in equipment, which are advanced by requirements of high precision of frequency synthesis with the simultaneous provision of spectral purity of the synthesized signal.

Keywords: ADC, DAC, Direct Digital Synthesizer (DDS).

Вступ

В апаратурі зв'язку синтезатори частоти, будучи центральним елементом системи налаштування, визначають її основні технічні характеристики. Як за технічними, так і економічними показниками синтезатор DDS (Direct Digital Synthesizer) задовольняє більшості вимог, які висуваються до синтезаторів частоти, забезпечуючи високу ступінь інтеграції, можливість програмного управління і малі габарити [1]. Параметри таких синтезаторів практично не залежать від температури і старіння елементів. Єдиним елементом, який відрізняється характерною для аналогових схем нестабільністю, є цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП). Завдяки відмінним технічним характеристикам і високій швидкості перестройки частоти і фази синтезатори DDS поступово витісняють синтезатори, побудовані на основі системи ФАПЧ. Основні переваги синтезаторів DDS це:

- висока роздільна здатність за частотою та фазою;
- швидке переналаштування частоти (або фази);
- переналаштування за частотою без розриву фази і без викидів напруги на виході синтезатора.

Роздільна здатність за частотою може досягати тисячних часток Герца для вихідної частоти до декількох десятків мегагерц, що практично не можна досягти при використанні інших методах синтезу. Іншою характерною особливістю синтезаторів DDS є висока швидкість переналаштування на іншу частоту, яка визначається тільки швидкодією роботи цифрового інтерфейсу і цифрових схем, що входять до складу синтезатора. Третьою особливістю синтезаторів DDS є можливість формування модульованих сигналів безпосередньо в процесі синтезу [2].

Однак дискретизація і цифро-аналогове перетворення, яким піддається сигнал в синтезаторах DDS, накладають і певні обмеження:

- максимальна вихідна частота не може бути вище половини тактової (на практиці вона ще менше), але завдяки впровадженню нових технологій тактова частота постійно зростає;
- окремі побічні складові в спектрі сигналу на виході синтезатора DDS можуть бути значно більші, ніж в синтезаторах, побудованих на основі системи ФАПЧ, тому що спектральна чистота вихідного сигналу синтезатора DDS залежить від характеристик ЦАП;
- споживана синтезатором DDS потужність практично прямо пропорційна тактовій частоті і може досягати одиниць Ват для високочастотних синтезаторів, тому при високих тактових частотах такі синтезатори можуть виявитися непридатними для пристроїв з батарейним живленням.

Сучасна технологія виготовлення DDS дозволяє створювати інтегральні мікросхеми з 48-розрядним представленням значень накопичувального суматора. А наявність помилок в вигляді амплітудного і фазового шуму примушує шукати нові технічні рішення для побудови пристроїв компенсації помилок різної природи.

Огляд методів підвищення якості спектральних характеристик високошвидкісних обчислювальних синтезаторів частоти DDS

Обчислювальним синтезаторам притаманна операція квантування відліків фази та амплітуди синтезованих сигналів, що приводить до появи у вихідному спектрі бічних складових квазівипадкового характеру. Їх суму у деякому діапазоні частот зазвичай називають шумом квантування. Відповідно говорять про рівень шумових бічних складових або про рівень шуму квантування. Фазовий шум, що виникає у процесі квантування фази визначається за формулою [3]:

$$D_{\phi} = 20\lg\left[\frac{\pi}{2^{q+1}\sqrt{12}}\right], \tag{1}$$

де q – число відліків квантування фази на чверть періоду гармонійного сигналу. Квантування за рівнями в перетворювачі фаза-амплітуда створює амплітудний шум

$$D_{a} = 20\lg\left[\frac{1}{\sqrt{6(2^{n}-1)}}\right], \tag{2}$$

де n – кількість вихідних розрядів відліків перетворювача фаза-амплітуда на чверть періоду синусоїдального сигналу або розрядність ЦАП без врахування розрядів керування сегментами. Теоретично, за рівності розрядності накопичувального суматора, модуля пам'яті і ЦАП, відношення сигнал/шум на виході DDS може складати більше 190 дБ [1]. Проте, на жаль, технологія виготовлення великих інтегральних схем не дозволяє досягти такого значення розрядності перетворювача фаза-амплітуда і ЦАП. Як правило, у реальних синтезаторах використовується накопичувальний суматор із розрядністю 32 біта, розрядністю пам'яті 12–16 біт, розрядність шини даних 8–-16 одиниць. Це призводить до виникнення помилок у вигляді амплітудного і фазового шуму, що потребує пошуку нові технічні рішення для побудови пристроїв компенсації різного роду помилок.

В [3] показано, що в більшості сучасних DDS використовується достатньо висока на даному етапі розвитку мікроелектроніки розрядність ЦАП, яка складає 10-16 розрядів. Це забезпечує рівень вищих гармонік у вихідному сигналі не більше - (20…15 дБ). При цьому також знижується рівень дискретних компоненті спектру поблизу носійної, що проявляється у випадку нецілого числа. Також вказані деякі способи корекції такого роду складових:

1. Спеціальний вибір кроку дискретизації за рівнями.
2. Індивідуальна калібровка і вирівнювання рівнів спрацювання ключів у ЦАП і якості перехідних процесів.
3. Використання двох чи трьох ступенів вибірок із вихідного сигналу ЦАП, що виключають вплив початкового процесу після перемикання.
4. Використання подільників частоти з коефіцієнтом $N/(N+1)$ у складі схеми формування опорного коливання, що покращує співвідношення між вихідною і тактовими частотами для деяких несприятливих співвідношень вказаних частот.
5. Формування на вході молодшого розряду ЦАП псевдовипадкової послідовності для розширення спектру паразитних спектральних складових (ПСС).
6. Збільшення періоду повторення помилок усереднення використанням більш довгої псевдовипадкової послідовності.
7. Стохастизація (рандомізація) вихідних сигналів DDS.

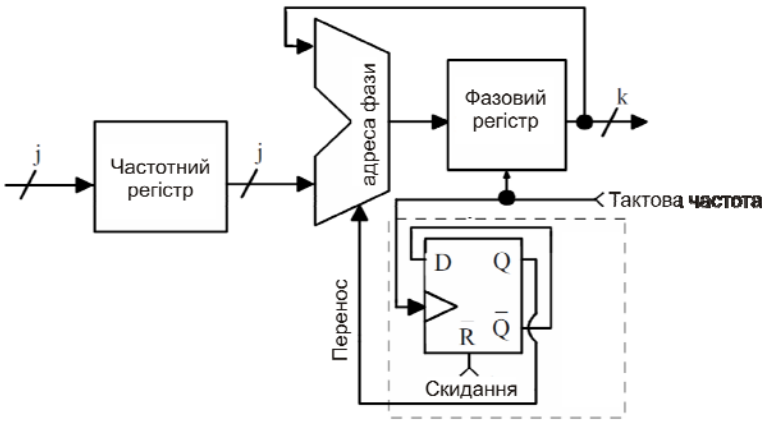


Рис. 1. Модифікований накопичувач фази Ніколаса

Перші чотири способи знижують величину похибки дискретизації, а останні три призводять до того, що спектральна густина потужності зосереджених за частотою паразитних спектральних складових

розподіляється більш рівномірно, наближається до рівня шумових складових.

Розглянемо метод зменшення рівнів бічних спектральних складових, описаний у літературі як модифікований накопичувач фази Ніколаса [1].

Алгоритм функціонування цифрового обчислювального синтезатора дозволяє розробити доволі простий спосіб зменшення рівнів бічних складових у найгіршому випадку на 4 дБ. В структуру класичного фазового акумулятора введено додатковий елемент у відповідності до рис. 1. Така структура не порушує періодичність помилки послідовностей, однак розподіляє потужність бічних складових у пікових викидах у широкій смузі спектру.

Якщо найбільший спільний дільник $НСД(\Delta P, 2^{j-k})$, де ΔP – значення у частотному регістрі, рівний 2^{j-k-1}, то потужність бічних викидів сконцентрується у одному пікові (рис. 2). Найгірший випадок відношення потужності носійної до потужності бічної складової визначається як

$$\frac{C}{S} = (6,02k - 3,992) дБн, \quad (3)$$

де k – розрядність слова вихідного сигналу фазового накопичувача, що використовується як адреса в перетворювачі фаза-амплітуда. При моделюванні з параметрами розрядність накопичувача j=12, k=8, розрядність даних на виході ПЗП m=10, ΔP =264, відношення носійної до бічних складових склало 44,24 дБ, рис. 2.

При $НСД(\Delta P, 2^{j-k}) = 1$ потужність бічних викидів дробиться на велику кількість окремих «піків» рис.3. Якщо $j - k >> 1$, то співвідношення потужності носійної до потужності бічної складової складе $C/S \approx 6,02k$ дБн. Параметри моделювання параметри ті ж самі, що на рис. 2, лише ΔP = 265. Співвідношення сигнал/шум складе 48,08 дБ.

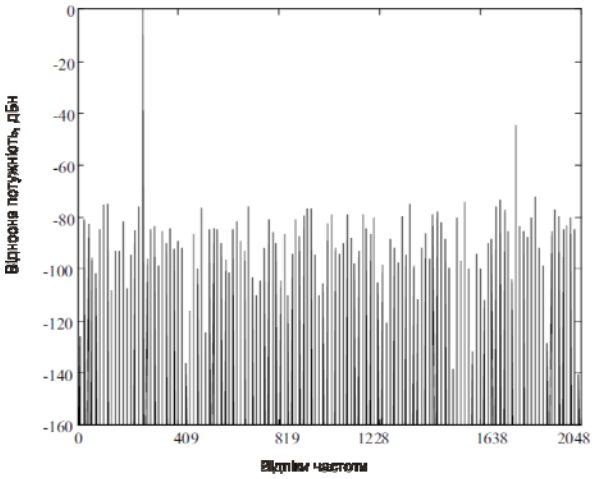


Рис. 2. Розподіл бічних складових, що виникають у процесі відсікання бітів фази класичного DDS синтезатора. При моделюванні з параметрами розрядність накопичувача *j*=12, *k*=8, розрядність даних на виході ПЗП *m*=10, ΔP =264

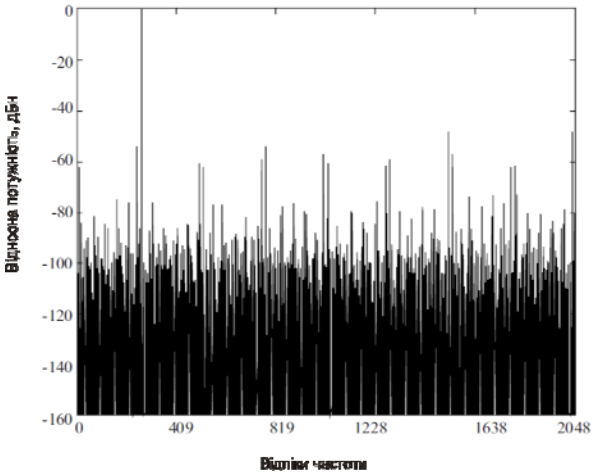


Рис. 3. Розподіл бічних складових, що виникають у процесі відсікання бітів фази класичного DDS синтезатора. При моделюванні з параметрами розрядність накопичувача *j*=12, *k*=8, розрядність даних на виході ПЗП *m*=10, ΔP =265

Незручність модифікації полягає у тому, що воно вводить зміщення у частоту вихідного сигналу DDS:

$$f_{out} = \frac{f_{clk}}{2^{j+1}}, \tag{4}$$

де f_{out} – тактова частота DDS. І при цьому відстройка буде незначною, якщо частота відліків буде невисокою, а розрядність фазового акумулятора великою.

Іншим ефективним методом подавлення бічних складових у спектрі вихідного сигналу є метод псевдо шумового формування і методика рандомізації, запропонована Вітлі [1].

Пристрій, що складається з накопичувального суматора і генератора випадкових чисел – рис. 4, генерує у цифровому вигляді значення кодів фази синтезованого сигналу.

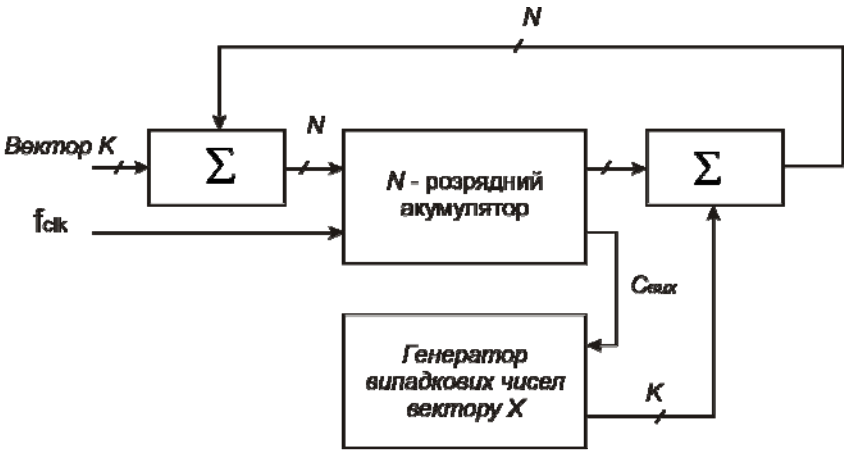


Рис. 4. Структурна схема модифікованого рандомізатора Вітлі

Під час кожного переповнення накопичувального суматора, до його вмісту додається випадкове число $X, 0 < X < K-1$. У той самий час попереднє значення X віднімається. Віднімання виконується таким чином, щоб середнє значення $X(i) - X(i-1)$ перетворювалось в нуль, а середня частота вихідних коливань лишалась такою самою, якою була задана сигналом керування. У результаті під час кожного переповнення накопичувального суматора до його вмісту додається випадкове число $-(K-1)/2 < X' < (K-1)/2$. Зазвичай X формується як послідовність псевдовипадкових чисел, які широко використовуються у техніці зв'язку.

Щоб проаналізувати результат, позначимо фазову помилку, що викликана дискретністю синтезатора, як e_c, $e_c < K$. Ймовірності того, що у такті T, помилка буде e_c або $T - e_c$, рівні

$$p(e_c) = e_c / K;$$
$$p(T - e_c) = 1 - e_c / K.$$

Середнє значення помилки затримки:

$$\tau_{cp} = \tau\, p(e_c) + (T - \tau)\, p(T - e_c). \tag{5}$$

Таким чином, у середньому, переповнення накопичувального суматора синтезатора, що використовує схему рандомізованої модуляції фази, відбувається у ті самі моменти часу, що і у звичайному синтезаторі. Це означає, що середній період синтезованої частоти не залежить від миттєвих значень вмісту накопичувального суматора, тому вихідна частота цього синтезатора однозначно і точно визначається значенням коду частоти. При цьому важливим є той факт, що час настання переповнення суматора не залежить від початкової фазової помилки. Це означає, що навіть якщо сусідні значення фазової помилки на початковому етапі корельовані, додавання випадкової величини X не впливає на середній час переповнення накопичувального суматора і усі бічні дискретні лінії у спектрі, що виникають внаслідок когерентності похибки, ліквідовуються. Таким чином, на виході замість дискретних бокових ліній буде з'являтися неперервний шум, пов'язаний з випадковістю між моментами перемикання накопичувального суматора. При цьому максимальний рівень бічних складових знижується.

Така процедура може перетворити усю енергію паразитного сигналу в енергію фазового шуму. Відношення спектральної густини шуму до потужності корисної гармоніки складає

$$\frac{N_0}{C} = \frac{\pi^2 f_{\text{clk}}}{f_{out}}, \tag{6}$$

де f_{clk} – тактова частота синтезатора.

Новизна процедури Вітлі полягає у її принципі; проте її важко реалізувати, особливо у високошвидкісній логіці, тому практичне значення цього методу обмежене.

Найбільшою перепоною на шляху реалізації методу Вітлі лежить обмежена швидкодія суматорів, які використовуються як у структурі накопичувального суматора так і у колах додавання/віднімання

псевдовипадкових чисел. Реальне застосування цього методу можливе лише із застосуванням суматорів, які здатні додавати числа за один або кілька тактів. Такі суматори будуються на принципах, що закладені у математичних теоріях непозиційних систем числення [4].

Нерізницеве фазове згладжування. В основі методу лежить принцип, згідно якого до фазової адреси перед процедурою відсікання фази додається рівномірно розподілена випадкова величина $z_p(n)$ (рис. 5 – джерело 1). Тоді вихідна послідовність цифрового синтезатора відліку:

$$x(n)=\sin\left(\frac{2\pi}{2^j}\left[P(n)+\varepsilon(n)\right]\right), \tag{7}$$

де $P(n)$ – значення фазового регістра.

Сумарний фазовий шум після відсікання складе

$$\varepsilon(n)=e_\phi(n)+z_p(n). \tag{8}$$

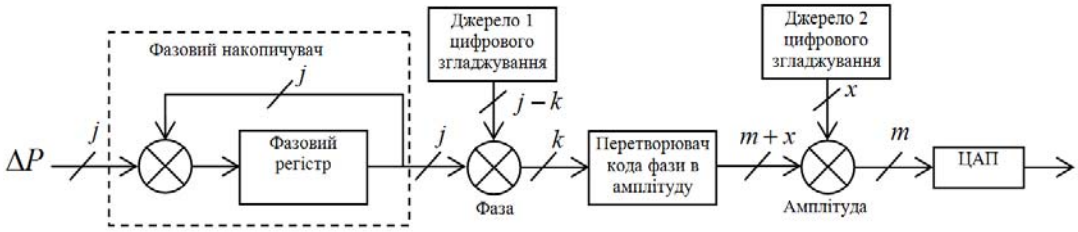


Рис. 5. Структурна схема методу нерізницевого фазового згладжування

Сумарний шум флуктуацій фази буде пропорційним $e_\phi(n)$ [3], якщо випадкове значення $z_p(n)$ додається до фазової адреси перед відсіканням до k бітів, як показано на рис. 6.

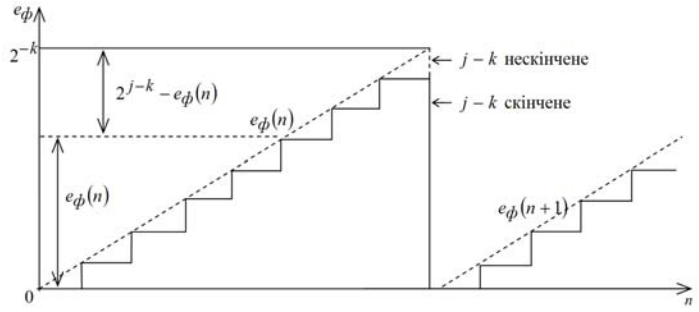


Рис. 6. Графік помилки відсікання фази

Рівномірно розподілена величина $z_p(n)$ змінюється у діапазоні $\left[0;2^{j-k}\right]$. Якщо $z_p(n)$ менше ніж $2^{j-k}-e_\phi(n)$, то $e_\phi(n)+z_p(n)$ буде відсікатись до 0. Сумарний відсічений фазовий шум

$$\varepsilon(n)=-e_\phi(n).$$

Середнє значення сумарного відсіченого фазового шуму по n відлікам рівне 0:

$$E\left(\varepsilon(n)\right)=-e_\phi(n)\frac{2^{j-k}-e_\phi(n)}{2^{j-k}}+\left(2^{j-k}-e_\phi(n)\right)\frac{e_\phi(n)}{2^{j-k}}.$$

Дисперсія повного відсіченого фазового шуму:

$$E\left(\varepsilon^2(n)\right)=-e_\phi^2(n)\frac{2^{j-k}-e_\phi(n)}{2^{j-k}}+\left(2^{j-k}-e_\phi(n)\right)^2\frac{e_\phi(n)}{2^{j-k}}=2^{j-k}e_\phi(n)-e_\phi^2(n)=2^{2(j-k)}\left[\frac{e_\phi(n)}{2^{j-k}}-\left(\frac{e_\phi(n)}{2^{j-k}}\right)^2\right].$$

Інформація про розташування та рівень бічних складових, а також про потужність шуму в спектрі $x(n)$ отримується на основі функції автокореляції

$$E\left\{x(n)x(n+m)\right\}=\sin\left(\frac{2\pi}{2^j}P(n)\right)\sin\left(\frac{2\pi}{2^j}P(n)\right)+\frac{4\pi}{2^{2j}}\cos\left(\frac{2\pi}{2^j}P(n+m)\right)E\left\{\varepsilon(n)\varepsilon(n+m)\right\}+\mathrm{O}\left(2^{-4k}\right).$$

Середнє значення автокореляційної функції визначається усередненням по часу:

$$\overline{R}_{xx}[m]\approx\frac{1}{2}\left[1+\frac{4\pi^2}{2^{2j}}\overline{R}_{ee}[m]\right]\cos\left(\frac{2\pi}{2j}P(m)\right),$$

де $\overline{R}_{ee}[m]=\mathrm{Avg}_n\left(E\left\{\varepsilon(n)\varepsilon(n+m)\right\}\right)$ – усереднена часова автокореляційна функція повного квантованого шуму. Слід пам'ятати, що для будь-якого фіксованого часу n розподіл ймовірностей $\varepsilon(n)$ і функція $p(n)$ повністю визначаються збуджуючим сигналом $z(n)$.

Відношення сигнал/шум ВСШ при $m = 0$ дорівнює:

$$C / N = \frac{1}{\left(4\pi^2 / 2^{2j}\right)\left(\overline{E\left\{\varepsilon^2\right\}}\right)}.$$

Синусоїда генерується як реальний сигнал так, щоб його потужність була однаково розподілена між від'ємними та додатними компонентами частоти. Потужність повного шуму розділяється на S бічних складових, де S – кількість відліків, причому період джерела збудження більше S. Звідси верхня межа відношення потужності корисної гармоніки до спектральної густини потужності шуму [4] $C / N \approx \left(6{,}02k - 9{,}94 + 10\lg S\right)$ дБн досягається при НСД$\left(\Delta P, 2^{j-k}\right) = 2^{j-k-1}$. Нижня межа $C / N \approx \left(6{,}02k - 11{,}94 + 10\lg S\right)$ дБн і досягається при $j >> k$ та НСД$\left(\Delta P, 2^{j-k}\right) = 1$.

Недоліком методу фазового згладжування є підвищений шумовий рівень. Проте потужність шуму рівномірно розподіляється у смузі вибірки, тому C / N буде збільшуватись при збільшенні кількості відліків. При фазовому згладжуванні є необхідними генератор шуму та змішувач, які роблять схему більш складною. Переповнення фазової адреси внаслідок згладжування не створює проблем, тому що фазовий накопичувач працює за принципом переповнення.

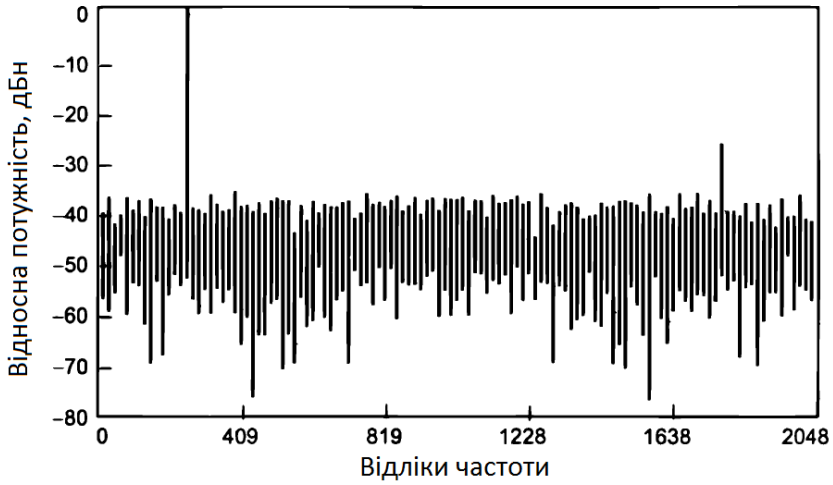


Рис. 7. Графік відносної потужності синтезованої частоти при не різницевому фазовому згладжуванні

На рис. 7 рівень несучого коливання по відношенню до бічних складових рівний 28,47 дБн, а відношення C / N = 44,20 дБн. Параметри, які моделювалися $j = 12$, $k = 3$, $m = 10$, $\Delta P = 256$. Число відліків частоти на рисунках 7,8,9,11,12 складає 4096.

Нерізницеве амплітудне згладжування. Якщо результат цифрового згладжування (із джерела 2, рис. 5) складається з вихідним сигналом перетворювача коду фази в амплітуду (ПФА), то вихідний сигнал цифрового синтезатора відліку може бути представлений як

$$\sin\left[\frac{2\pi}{2^j}\left(\Delta P_n - e_\phi(n)\right)\right] + z_A(n) - e_A(n),$$

де $z_A(n)$ – амплітудне згладжування [1]. Характеристика побічних складових входу цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) така ж сама, як і біля входу ЦАП, де квантування відбувається по $(m + x)$ бітам [1], так як $z_A(n)$ рандомізує частину помилок квантування (x бітів) на рис. 5. Якщо $z_A(n)$ є широкосмуговим рівномірно розподіленим на інтервалі $[-\Delta_A / 2, \Delta_A / 2]$ і незалежне від $e_A(n)$, то сумарна амплітудна потужність шуму після згладжування

$$E\{z_A^2\} + E\{e_A^2\} = \Delta_A^2 / 12 + \Delta_A^2 / 12,$$

де $\Delta_A = 2^{-m}$, а $E\{e_A^2\}$ – визначена в [1].

Потужність помилок амплітуди подвоюється після згладжування, але потужність помилок розподіляється по всім дискретним частотним компонентам. Якщо потужність побічних складових розподіляється на $P_e / 2$ (P_e – нормований період (вихідного сигналу) відносно тактової частоти, $P_e = 2^j / НОД(\Delta P, 2^j)$) побічних складових], то після згладжування сумарна шумова потужність, розділена на P_e побічних складових, і відношення C / N не змінюються за той же самий вимірюваний період P_e. Тоді згідно [1] отримаємо

$$\frac{C}{N}=\left[6{,}02m+1{,}76+10\log_{10}\left(\frac{P_e}{4}\right)\right],\ \text{дБн}. \tag{9}$$

Основними недоліками згладжування амплітуди є більш складна реалізація і зменшений динамічний діапазон. У цьому методі розмір ПФА збільшується до $2^k\cdot x$, де k – довжина слова фазової адреси, x – довжина слова амплітудної помилки. Вихідний сигнал ПФА повинен бути зменшений (масштабований) так, щоб первинний сигнал після згладжування залишався в межах області ненасичення. Втрата може бути невеликою, коли число рівнів квантування велика.

На рис. 8 показаний спектр потужності синусоїдальної хвилі без згладжування амплітуди. Моделюються параметри: $j=12$, $k=12$, $m=8$, $x=8$, $\Delta P=512$. Відношення $C/N=51{,}2$ дБ.

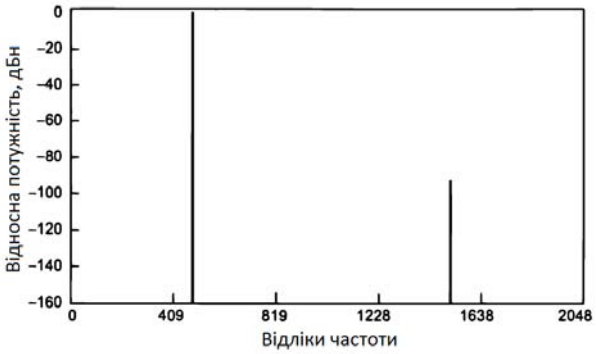


Рис. 8. Спектр потужності синусоїдальної хвилі без згладжування амплітуди. Моделюються параметри: $j=12$, $k=12$, $m=8$, $x=8$, $\Delta P=512$. **Відношення** $C/N=51{,}2$ **дБ**

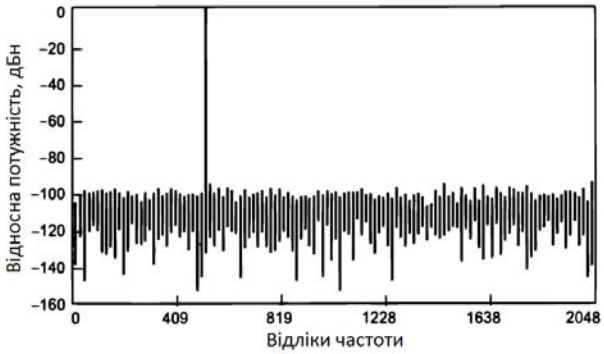


Рис. 9. Спектр потужності 16-бітного синусоїдального амплітудного згладжування випадкової послідовності, що розподілена рівномірно по $[-2^{-8}/2, 2^{-8}/2]$ **до усічення в 8 біт**

На рис. 9 показаний спектр потужності 16-бітного синусоїдального амплітудного згладжування випадкової послідовності, що розподілена рівномірно по $[-2^{-8}/2, 2^{-8}/2]$ до усічення в 8 біт. Відношення C/N становить приблизно 80,1 дБн/біт для відліку ШПФ (80,02 дБн (3)).

Різницеве згладжування. Нерізницеве згладжування використовується, щоб зменшити небажані побічні компоненти, однак його недолік полягає в тому, що після згладжування рівень широкосмугового шуму досить високий. Щоб запобігти збільшенню шуму, можна використовувати різницеве згладжування, при якому згладжування застосовується до цифрових вибірок і віднімається з аналогового вихідного сигналу синтезатора [1]. Вимоги віднімання згладжених даних на виході синтезатора робить цей метод складним для його реалізації на практиці. Тому з метою практичної реалізації використовується високочастотне фільтроване згладжування, при якому велика частина потужність зосереджена в невикористаній спектральній області між межею смуги пропускання фільтра нижніх частот і частотою Найквіста. Після того як вихідний сигнал цифрового синтезатора відліку пройде через фільтр нижніх частот, залишиться тільки частина потужності згладжування. Низькочастотна фільтрація спеціально додана для різницевого згладжування.

Високочастотне фільтроване фазове згладжування. Якщо цифровий високочастотний сигнал фазового згладжування $z_{нр}(n)$ (від джерела 1 на рис. 10) застосовується до вихідного сигналу фазового накопичувача, то вихідний сигнал цифрового синтезатора відліку може бути виражений як [1]

$$\sin\left[\frac{2\pi}{2^j}\left(\Delta P_n-e_ф(n)+z_{вф}(n)\right)\right]-e_A(n). \tag{10}$$

Якщо спотворення і фазова помилка, припустимо, є малими величинами щодо фази, то вихідний сигнал цифрового синтезатора різницевого згладжування може бути представлено у вигляді

$$\sin\left(2\pi\frac{f_{вих}}{f_s}n\right)+\cos\left(2\pi\frac{f_{вих}}{f_s}n\right)\frac{2\pi}{2^j}\left[z_{вф}(n)-e_ф(n)\right]-e_A(n), \tag{11}$$

де $f_{вих}$ – частота вихідного сигналу цифрового синтезатора відліку, а f_s – частота вибірок цифрового синтезатора різницевого згладжування.

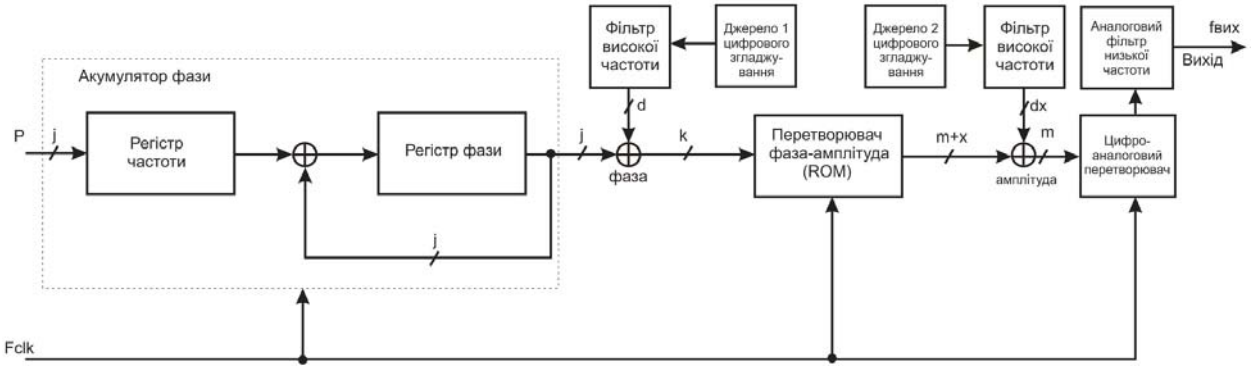


Рис. 10. Структурна схема синтезатора різницевого згладжування

Розглянуте фазове згладжування представляється в формі амплітудно-модульованої синусоїди. Модуляція переміщує згладжуючий спектр вгору і вниз по частоті $f_{вих}$ так, щоб більша частина згладженої потужності була в смузі пропускання вихідного сигналу цифрового синтезатора різницевого згладжування. Таким чином, високочастотне фільтроване фазове згладжування працює тільки тоді, коли частота вихідного сигналу цифрового синтезатора різницевого згладжування нижче використовуваної тактовою частоти.

Високочастотне фільтроване амплітудне згладжування . Основною перевагою даного метода є те, що його використовують, щоб рандомізувати нелінійність ЦАП [5]. Якщо результат цифрового згладжування (з джерела 2 на рис. 10) додається до вихідного сигналу ПФА, то вихідний сигнал DDS можна представити як:

$$\sin\left[\frac{2\pi}{2^j}\left(\Delta P_n - e_\phi(n)\right)\right] + z_{BA}(n) - e_A(n), \tag{12}$$

де $z_{BA}(n)$ – високочастотне фільтроване амплітудне згладжування, більша частина потужності якого знаходиться в невикористаній спектральній області між границею полоси фільтра нижніх частот і частотою Найквіста.

Даний вид згладжування має дещо слабші рандомізуючі властивості ніж широкосмугове згладжування, що може бути скомпенсовано підвищенням величини високочастотного фільтруючого згладжування. Властивість зниження побічних складових за допомогою високочастотного амплітудного згладжування достатньо важко аналізувати теоретично, тому була проведена перевірка моделюванням. Втрата динамічного діапазону при цьому більша, ніж у випадку не різницевого згладжування, оскільки величина високочастотного фільтруючого згладжування повинна бути вища. Однак ця втрата не велика, коли число рівнів квантування велике.

Під час моделювання був використаний високочастотний фільтр Чебишева 4-го порядку типу 1 з частотою зрізу $0,42 f_S$. На рис. 11 високочастотне фільтрувальне амплітудне згладжування представлене випадковою послідовністю, яка розподілена рівномірно в діапазоні $\left[-2^{-7}/2,\ 2^{-7}/2\right]$.

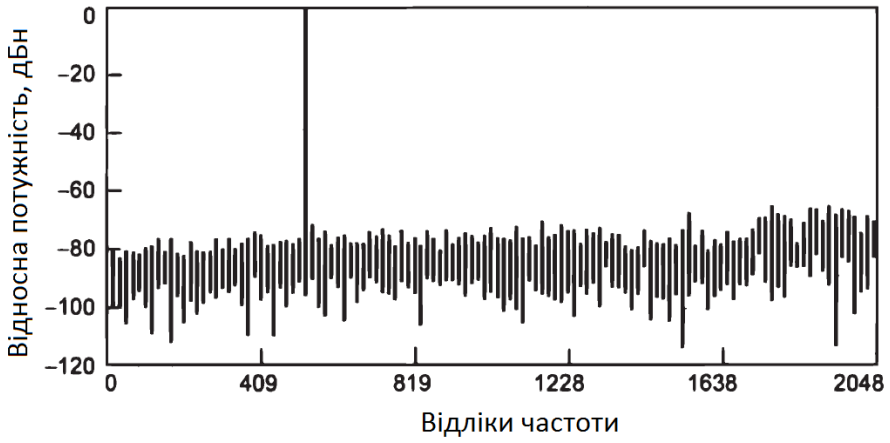


Рис. 11. Результати моделювання високочастотного фільтрувального амплітудного згладжування

Обробка виконана цифровим високочастотним фільтром до згладжування. Відношення несучої до побічної складової не менше ніж 69,25 дБ.

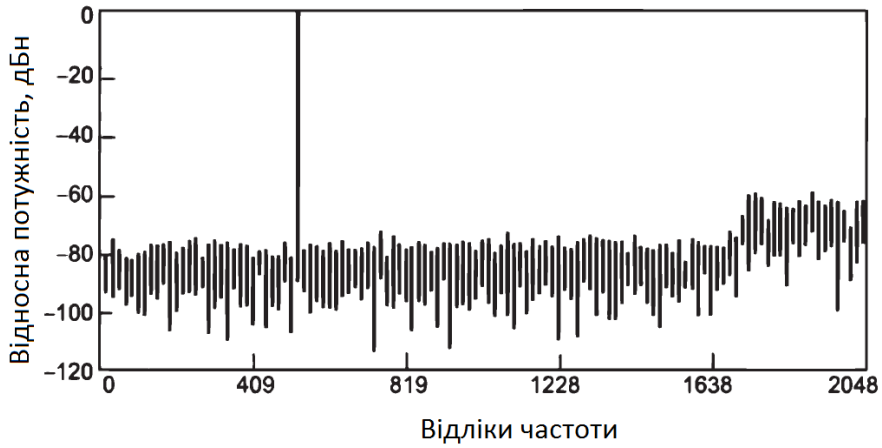


Рис. 12. Результати моделювання високочастотного фільтрувального амплітудного згладжування

На рис. 12 амплітудний діапазон високочастотного фільтруючого амплітудного згладжування збільшений з $\left[-2^{-7}/2,\ 2^{-7}/2\right]$ до $\left[-2^{-6}/2,\ 2^{-6}/2\right]$, таким чином досягнуто подавлення побічних складових. Відношення C/N складає 83,2 дБ.

Зворотній зв'язок, що переналаштовується за помилкою. Суть даного методу полягає в тому, що помилки квантування подаються назад через окремий фільтр для корегування результатів в наступних відліках [5]. Одним із головних факторів, що визначають спектральну чистоту звичайного DDS, є розрізнювальна здатність ПФА. На жаль велика ємність запам'ятовуючого пристрою ПФА призводить до більш високої трати енергії, знижує швидкодію, підвищує вартість. Необхідне число бітів фазової адреси можна зменшити при використанні зворотного зв'язку за фазовою помилкою.

В DDS на високих частотах більша частина побічних паразитних складових виникає не за рахунок помилок квантування, а за рахунок динамічних нелінійностей аналогового вихідного сигналу ЦАП [7]. Необхідна довжина слова ЦАП може бути зменшена при використанні амплітудного зворотного зв'язку за помилкою.

Значення фази генерується, використовуючи властивість переповнення по модулю 2^J j-бітного фазового акумулятора (рис. 13).

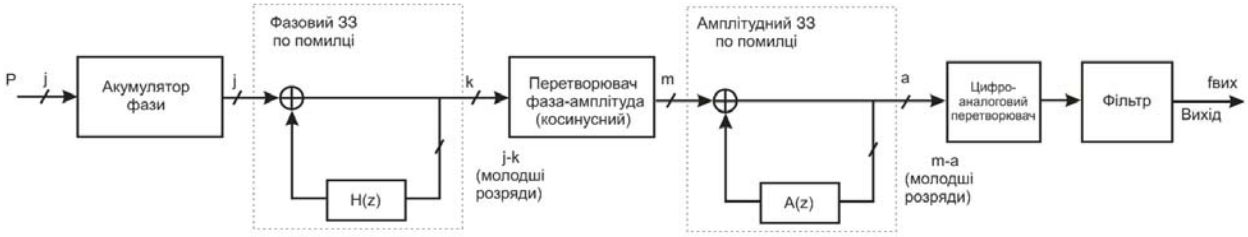


Рис. 13. Структурна схема синтезатора із зворотнім зв'язком за помилкою

Швидкість переповнення визначає частоту вихідного сигналу [6]. Аналоговий фільтр видаляє шуми і спотворення, які вносить ЦАП, що виникають поза смугою пропускання. Полоса пропускання аналогового фільтра налаштовується у відповідності до частоти вихідного сигналу DDS.

В фазовому зворотному зв'язку за помилкою даний зворотній зв'язок включається між фазовим накопичувачем і ПФА. Фазова помилка (j-k молодших бітів фазового слова) подається на фазовий фільтр зворотного зв'язку за помилкою $\left(H\left(z\right)\right)$. Фільтрований вихідний сигнал додається до значення фази , таким чином, щоб передавальна функція між фазовим входом $P\left(z\right)$ і фазовим виходом $Y\left(z\right)$, може бути представлена у вигляді:

$$Y\left(z\right)=P\left(z\right)-E\left(z\right)\left(1-H\left(z\right)\right)=P\left(z\right)-E\left(z\right)\cdot PEF\left(z\right),\qquad(13)$$

де $P\left(z\right)$ і $E\left(z\right)$ – z-перетворення фазового входу і фазового сигналу помилки, $PEF\left(z\right)=\left(1-H\left(z\right)\right)$ - передавальна функція фазового зворотного зв'язку за помилкою.

В амплітудному зворотному зв'язку за помилкою фільтр зворотного зв'язку включається після ПФА. Амплітудна помилка (m-a молодших бітів амплітудного слова) подається на амплітудний фільтр зворотного зв'язку за помилкою $\left(A\left(z\right)\right)$. Амплітуда A вихідного сигналу ПФА повинна бути невеликого рівня, щоб гарантувати сумарне значення вихідного сигналу і вихідного сигналу амплітудного фільтру

зворотного зв'язку за помилкою в межах робочої області без спотворень. Така втрата може бути незначною, коли має місце велике число рівнів квантування. Переповнення через фазовий зворотній зв'язок за помилкою не суттєве при формуванні фазової адреси, оскільки акумулятор фази працює відповідно до принципу переповнення. Щоб не допустити переповнення, значення вихідного сигналу ПФА масштабують.

Висновки

Розглянуто принципи організації прямих цифрових синтезаторів частоти – DDS. Проаналізовано основні джерела похибок, що виникають у таких синтезаторах. Виконано математичний аналіз функціонування основних елементів такого синтезатора з точки зору мінімізації фазових шумів. Узагальнено застосування різноманітних методів для зменшення загального рівня амплітудних та фазових шумів, та абсолютних рівнів бічних складових основного синтезованого сигналу. Отже застосування наведених методів і структур цифрових синтезаторів прямого синтезу DDS на їх основі значно покращує шумові характеристики синтезаторів, проте ускладнює їх внутрішню будову. Запропоновані методи та структури синтезаторів DDS можуть бути використані у апаратурі, до якої висуваються вимоги високої точності синтезу частоти з одночасним забезпеченням спектральної чистоти синтезованого сигналу.

Література

1. Vankka J. Direct Digital Synthesizers: Theory, Design and Applications / J. Vankka // Helsinki University of Technology. – 2000. – С. 192.

2. Макаренко В.В. Синтезаторы частот прямого цифрового синтеза / В.В. Макаренко // ЭКиС Телекоммуникации и связь. – Киев, 2010. – № 1. – С. 34–46.

3. Полікаровських О.І. Джерела шумів в DDS та метод зменшення їх періодичної складової / О.І. Полікаровських, Ю.А. Бабій // Міжнародна науково-практична конференція Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах – 2012. – Хмельницький, 2012. – № 1. – С. 67–72.

4. Полікаровських О.І. Способи побудови швидкодіючих цифрових обчислювальних синтезаторів багаторівневих сигналів / О.І. Полікаровських // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2012.– № 5. – С. 252 –257.

5. Полікаровських О.І. Оцінка співвідношення сигнал–шум у CORDIC цифрових обчислювальних синтезаторах / О.І. Полікаровських // Міжнародний науково-технічний журнал Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький, 2012. – № 3. – С. 52–57.

6. Полікаровських О.І Дослідження параметрів шуму прямих цифрових обчислювальних синтезаторів / О.І. Полікаровських, І.В. Троцишин // Цифрові технології. – Одеса, 2013. – Вип. 14. – С. 120–128.

References

1. Vankka J. Direct Digital Synthesizers:Theory, Design and Applications / J. Vankka // Helsinki University of Technology. – 2000. – S. 192

2. Makarenko V.V. Syntezatoru chastot priamoho tsyfrovoho synteza / V.V. Makarenko // EKyS Telekommunykatsyy y sviaz – h. Kyev, 2010.– №1. – S.34 –46

3. Polikarovskykh O.I. Dzherela shumiv v DDS ta metod zmenshennia yikh periodychnoi skladovoi / O.I. Polikarovskykh, Yu.A. Babii // Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh – 2012. – Khmelnytskyi, 2012.– № 1. – S. 67–72.

4. Polikarovskykh O.I. Sposoby pobudovy shvydkodiiuchykh tsyfrovykh obchysliuvalnykh syntezatoriv bahatorivnevykh syhnaliv / O.I. Polikarovskykh // Herald of Khmelnytsky National University. – Khmelnytskyi, 2012.– № 5. – S. 252 –257.

5. Polikarovskykh O.I. Otsinka spivvidnoshennia syhnal–shum u CORDIC tsyfrovykh obchysliuvalnykh syntezatorakh / O.I. Polikarovskykh // Mizhnarodnyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – Khmelnytskyi, 2012. – № 3. – S. 52–57.

6. Polikarovskykh O.I Doslidzhennia parametriv shumu priamykh tsyfrovykh obchysliuvalnykh syntezatoriv/ O.I. Polikarovskykh, I.V. Trotsyshyn Tsyfrovi tekhnolohii. – m. Odesa, 2013.– Vyp.14. – S.120–128

Рецензія/Peer review : 08.11.2017 р. Надрукована/Printed :02.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Бойко Ю.М.

УДК 621.306.6

В.М. МЕЛЬНИЧУК, О.І. ПОЛІКАРОВСЬКИХ
Хмельницький національний університет

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ЦИФРО-АНАЛОГОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ У ПРЯМИХ ЦИФРОВИХ СИНТЕЗАТОРАХ ЧАСТОТИ (DDS)

У даній роботі проаналізовано параметри прямих цифрових синтезаторів частоти (DDS). Побудована узагальнена модель тестового блоку для аналізу ШПФ сигналу з виходу DDS синтезатора. Розраховано наступні параметри: сигнал–шум–спотворення (SINAD); співвідношення сигнал–шум (SNR); ефективна кількість бітів (ENOB). Наведено математичні співвідношення між цими параметрами.

Ключові слова: SINAD, ENOB, SNR, THD, DDS, ШПФ, прямий синтезатор частоти (DDS), direct digital synthesizer.

V. MELNYCHUK, O. POLIKAROVSKYKH
Khmelnytsky National University

ANALYSIS OF THE PARAMETERS OF DIGITAL-TO-ANALOG CONVERSION IN DIRECT DIGITAL FREQUENCY SYNTHESIZERS (DDS)

In this paper, the basic parameters of direct digital frequency synthesizers (DDS) are analyzed. A generalized model of the test block for the analysis of the FFT signal from the output of the DDS synthesizer was constructed. The following parameters are calculated: signal–noise–distortion (SINAD); signal–to–noise ratio (SNR); effective number of bits (ENOB). The mathematical relations between these parameters are given. Six popular specifications for quantifying ADC dynamic performance are SINAD (signal–to– noise–and–distortion ratio), ENOB (effective number of bits), SNR (signal–to–noise ratio), THD (total harmonic distortion), THD + N (total harmonic distortion plus noise), and SFDR (spurious free dynamic range). Although most DDS manufacturers have adopted the same definitions for these specifications, some exceptions still exist. Because of their importance in comparing DDSs, it is important not only to understand exactly what is being specified, but the relationships between the specifications. The article analyzes the parameters of digital-analogue conversion in direct frequency synthesizers (DDS). The mathematical relations between SINAD, SNR and THD are obtained. The results of synthesized signal analysis using these parameters are presented. The signal-to-noise ratio (SNR, or sometimes called the SNR without harmonics) is calculated from FFT data in the same way as SINAD, except that the harmonics of the signal are eliminated from the calculation, leaving only the noise ratio. It has been established that only the first 5 harmonics should be excluded, since they dominate, and the following do not have a significant effect. Since SINAD, SNR, ENOB, THD, THD + N, and SFDR are common indicators of dynamic DDS performance, the main task of the study is to establish relationships between these parameters in the context of the manufacturer's specification. The SINAD graph shows that the characteristics of the synthesized signals deteriorate due to high-frequency distortion and are usually constructed for frequencies that are significantly higher than the Nyquist frequency, so we can determine the power of additional components without sampling. Also in work the structural scheme of the test set for analysis of the FFT signal from the output of DDS is analyzed. Using the ADIsimDDS program of the Analog Devices for DDS synthesizers, a typical FFT output for DDS AD9851 with an input clock rate of 95 MHz was investigated.

Keywords: SINAD, ENOB, SNR, THD, DDS, ШПФ, direct digital synthesizer (DDS), direct digital synthesizer

Постановка задачі

До важливих параметрів для кількісної оцінки динамічної продуктивності DDS відносять: SINAD (SIgnal–to–Noise And Distortion ratio) – це співвідношення сигнал/шум плюс спотворення або відношення суми сигналу, шуму і спотворень до сумарного рівня шуму і спотворень; ENOB (Effective Number Of Bits) – це ефективна кількість двійкових розрядів або ефективна кількість біт; SNR (Signal–to–Noise Ratio) – це співвідношення сигнал/шум, THD (Total Harmonic Distortion) – коефіцієнт нелінійних спотворень; THD + N (Total Harmonic Distortion plus Noise) – це коефіцієнт нелінійних спотворень плюс шум; SFDR (Spurious–Free Dynamic Range) – динамічний діапазон вільний від паразитних складових. Хоча більшість виробників DDS прийняли однакові визначення для цих параметрів, деякі винятки все ще існують. Через їх важливість при порівнянні DDS важливо не тільки точно зрозуміти, що конкретний параметр означає, але і правильно розраховувати співвідношення між цими параметрами.

Виклад основного матеріалу

Існує кілька способів кількісної оцінки спотворень та шумів у DDS синтезаторах. Всі вони засновані на аналізі ШПФ (Швидке Перетворення Фур'є) з використанням узагальненої тестової установки, яку показано на рис. 1 [1].

Спектральний вихід ШПФ є серією точок $M / 2$ в частотній області (M – це розмір ШПФ, іншими словами кількість вибірок, збережених в буферній пам'яті). Інтервал між точками дорівнює f_S / M, а загальний діапазон частот – від постійного струму до $f_S / 2$, де f_s – частота дискретизації. Ширина кожної частоти комірки в бітах (іноді називається роздільністю ШПФ) дорівнює f_S / M. На рисунку 2 показаний вихід ШПФ для ідеального DDS. Потрібно звернути увагу на те, що теоретично рівень шуму ШПФ дорівнює SNR плюс коефіцієнт посилення ШПФ, $10 \times log\left(M / 2\right)$. Важливо пам'ятати, що значення шуму, що використовується в обчисленні SNR, являє собою шум, який поширюється на усю ширину смуги Найквіста (від постійного струму до $f_S / 2$), але ШПФ діє як вузькосмуговий аналізатор спектру з пропускною здатністю f_S / M, що рухається по спектру. Це призводить до зменшення шуму на величину,

рівну коефіцієнту підсилення процесу, такого ж ефекту, як і звуження смуги пропускання аналогового аналізатора спектра.

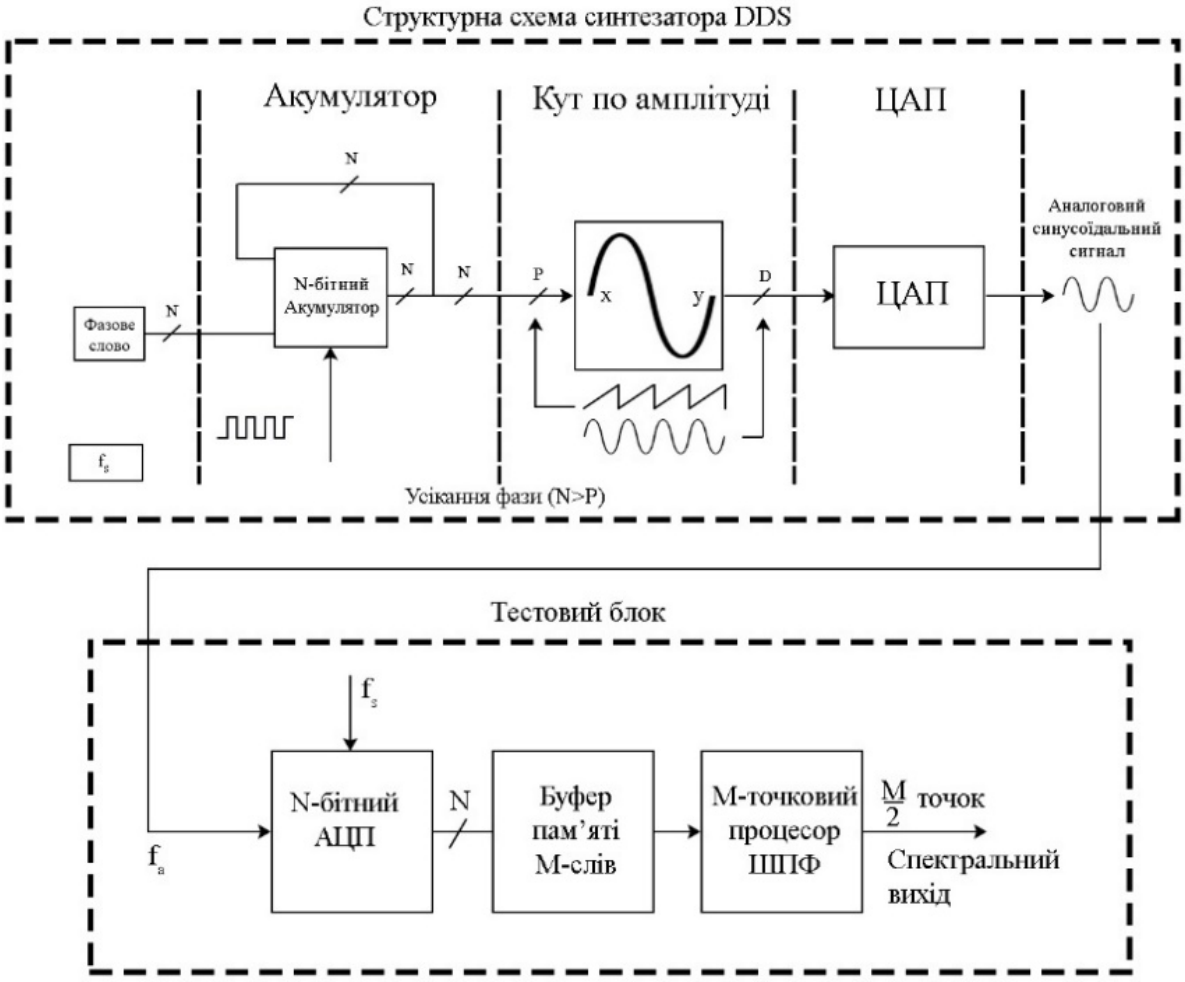


Рис. 1. Узагальнена структурна схема тестової установки для аналізу ШПФ сигналу з виходу DDS

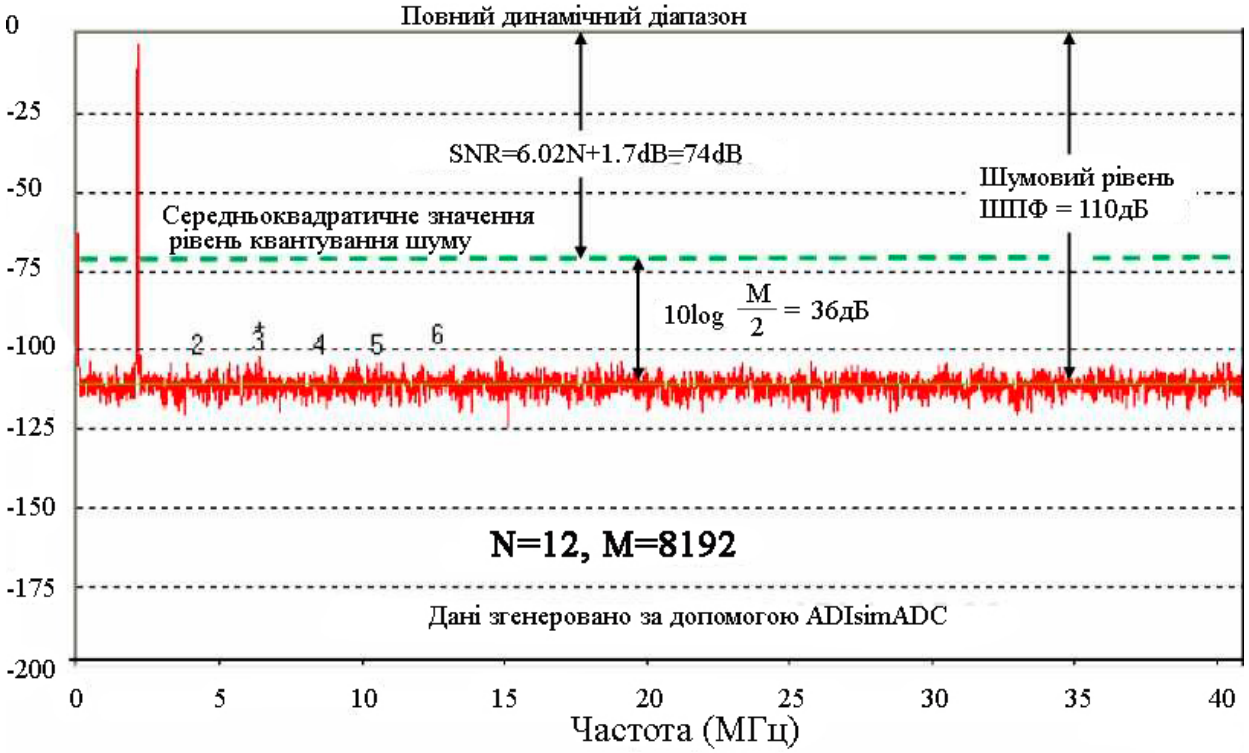


Рис. 2. ШПФ з виходу ідеального DDS, вхід = 2.111 МГц, f_s = 82 Мвиб/с, усереднено 5 ШПФ, M = 8192

Дані ШПФ, показані на рисунку 2, являють собою середнє значення по 5 окремих ШПФ. Потрібно звернути увагу, що усереднення числа ШПФ не впливає на середній рівень шуму, воно лише потрібно для того, щоб «згладити» випадкові складові, що містяться в кожній частотній комірці.

Вихід ШПФ можна використовувати як аналоговий аналізатор спектру для вимірювання амплітуди різних гармонік і складових шуму оцифрованого сигналу. Гармоніки вхідного сигналу можна відрізнити від інших типів спотворень по їх розташуванню в частотному спектрі. На рисунку 3 показаний синтезований сигнал DDS 7 МГц, тактований від 20 Мвиб/с, і розташування перших 9 гармонік. Накладені гармоніки f_a з'являються на частотах, рівних $\left| \pm Kf_S \pm nf_a \right|$, де n – порядок гармоніки, а K = 0, 1, 2, 3, ... Друга і третя гармоніки, як правило, єдині зазначені в технічній документації, оскільки вони, як правило, є найбільшими, хоча в деяких технічних даних може вказуватися значення лише найгіршої гармоніки.

Гармонійне спотворення зазвичай вказується в дБ (децибели нижче несучої), хоча у деяких випадках його вказують у відсотках. Це є відношення середньоквадратичного сигналу до середньоквадратичного значення даної гармоніки. Гармонійні спотворення зазвичай вказуються з вхідним сигналом близько повної шкали (зазвичай від 0,5 до 1 дБ нижче повної шкали для запобігання відсікання), але його можна вказати на будь-якому рівні. Для сигналів, значно менших, ніж повний динамічний діапазон, спотворення відбуваються шляхом диференціальної нелінійності ЦАП перетворювача, а не гармоніки опорної частоти, можуть обмежувати якісні параметри синтезованих сигналів [2].

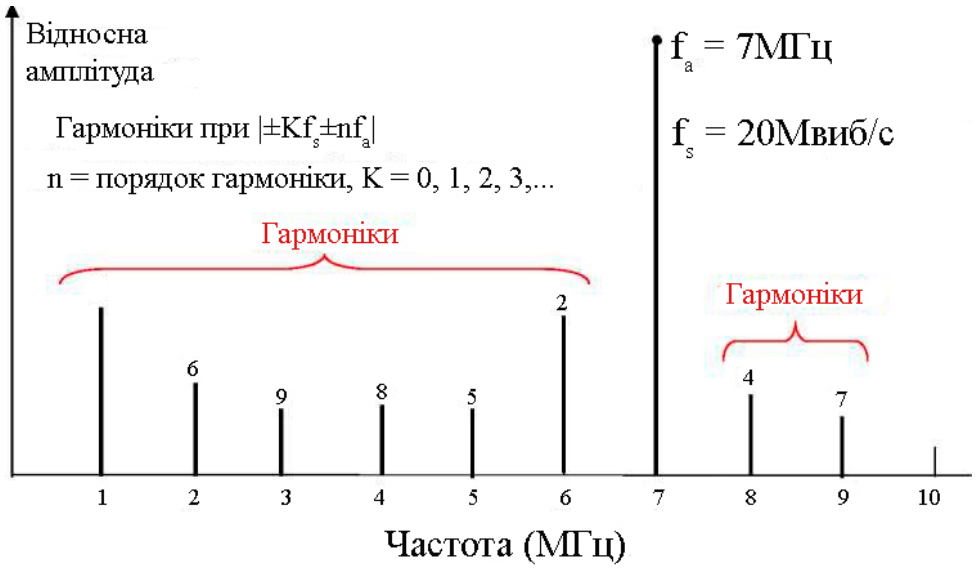


Рис. 3. Розташування продуктів спотворення: вхідний сигнал = 7 МГц, частота дискретизації = 20 Мвиб/с

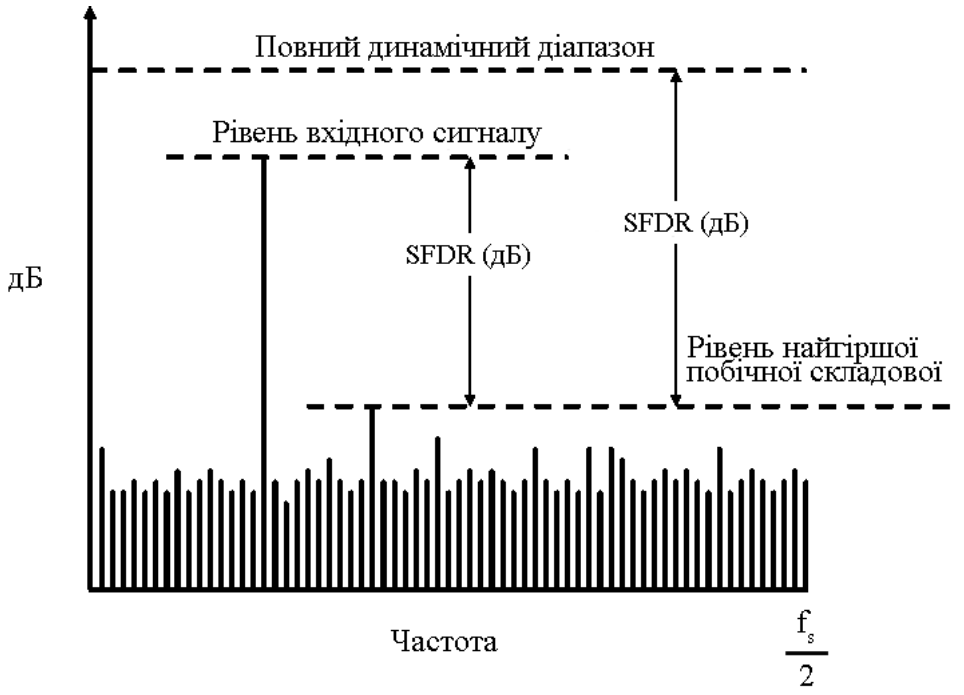


Рис. 4. Динамічний діапазон вільний від паразитних складових (SFDR)

Повне гармонійне спотворення (THD) – це відношення середньоквадратичного значення основного сигналу до середнього значення квадрата кореню суми його гармонік (як правило, істотні тільки перші 5 гармонік). THD в синтезаторах DDS також зазвичай вказується з вхідним сигналом, близьким до повного динамічного діапазону, хоча його можна вказати на будь-якому рівні.

Коефіцієнт нелінійних спотворень плюс шум (THD + N) – це відношення середньоквадратичного значення основного сигналу до середнього значення квадрата кореню суми його гармонік плюс всі складові шуму (виключаючи постійний струм). Тому необхідно вказати смугу пропускання, по якій вимірюється шум. У ШПФ смуга пропускання дорівнює постійний струм до $f_S / 2$. Якщо смуга пропускання вимірювання дорівнює постійний струм до $f_S / 2$ (ширина смуги Найквіста), то *THD+N* дорівнюватиме SINAD.

Динамічний діапазон вільний від паразитних складових (SFDR) являє собою відношення середньоквадратичного значення сигналу до середньоквадратичного значення найгіршого паразитного сигналу незалежно від того, де він з'являється у частотному спектрі. Рівень найгіршої побічної складової зазвичай є гармонійним вихідним сигналом. SFDR є важливим параметром в системах зв'язку, оскільки він відображає найменше значення сигналу, яке можна відрізнити від паразитного сигналу, який потрібно вилучити для покращення якості сигналу. SFDR може бути заданий відносно повного динамічного діапазону (дБ ПДД) або по відношенню до фактичної амплітуди сигналу (дБ ФАС). Графічно параметр SFDR показано на рис. 4 [3].

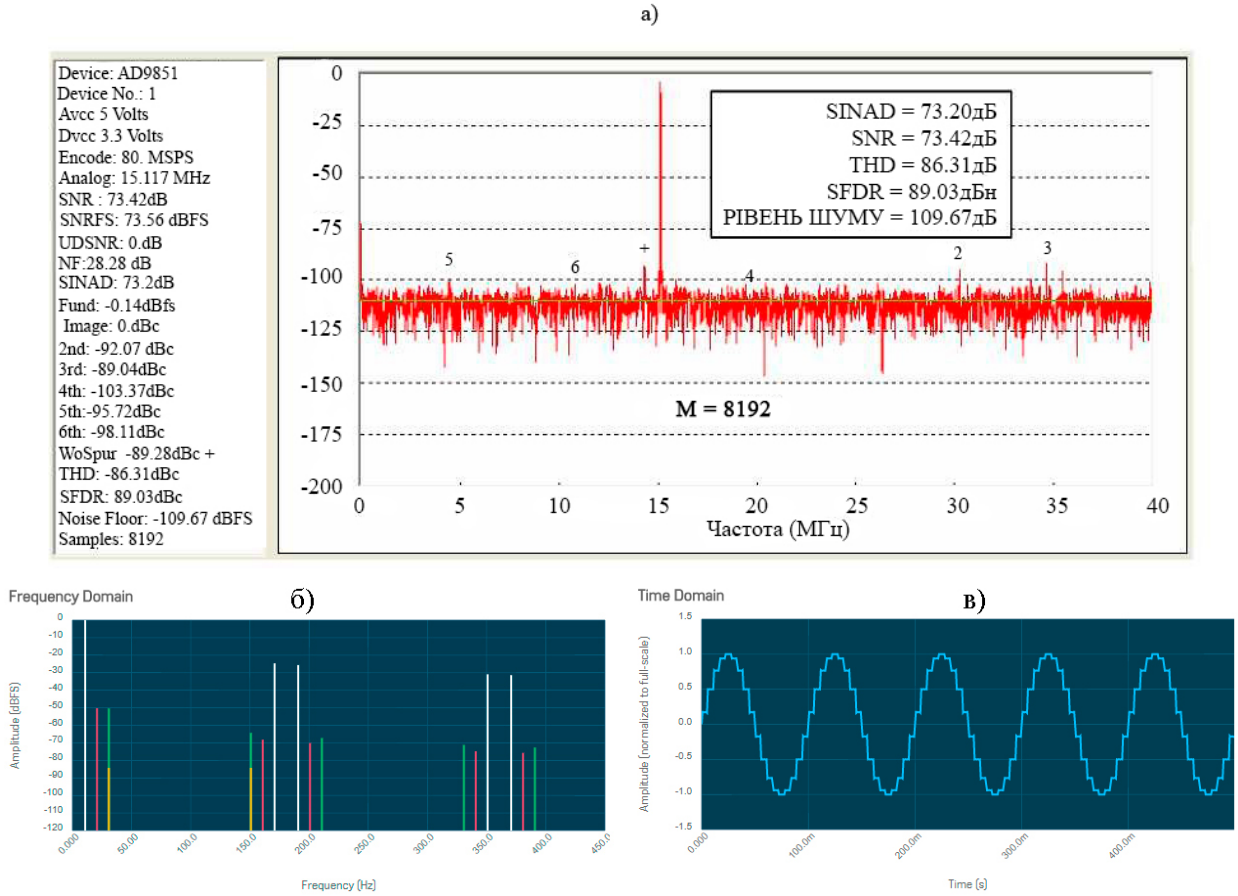


Рис. 5. AD9851 14–біт, 80Мвиб/с DDS f_{in} = 180MHz, f_{out} = 10MHz, дані отримані за допомогою ADIsimDDS

Програма ADIsimDDS для синтезаторів DDS дозволяє оцінювати різні високопродуктивні DDS на робочих частотах, а також частотах дискретизації. Моделі ADIsimDDS дають точне уявлення фактичної продуктивності, а типовий вихідний сигнал ШПФ для DDS AD9851 показаний на рисунку 5,б, вхідна частота становить 95 МГц, а згладжена 15 МГц за допомогою обробки вибірки. На виході також відображаються розташування другої та третьої гармонік. В цьому випадку ці гармоніки є комбінаційними складовими. Програма також обчислює і табулює важливі паразитні складові, які показано на відповідному графіку, рис. 5,а.

Розрахунок параметрів сигнал–шум–спотворення (SINAD), співвідношення сигнал–шум (SNR) і ефективна кількість бітів (ENOB)

SINAD і SNR заслуговують особливої уваги, тому що між виробниками DDS все ще є деякі відмінності щодо їх точного визначення. Співвідношення сигнал–шум–спотворння (SINAD або

$S/\left(N+D\right)$ – це відношення середньоквадратичної амплітуди сигналу до квадратного кореню із суми квадратів (RSS) всіх інших компонентів синтезу, включаючи гармоніки, але без врахування постійного струму. SINAD є хорошим показником загальної динамічної продуктивності DDS, оскільки він включає в себе всі складові, які створюють шум та побічні складові. SINAD часто відображається для різних вхідних амплітуд і частот. Для заданої вхідної частоти та амплітуди SINAD дорівнюватиме *THD+N*, за умови, що ширина полоси для вимірювання шуму однакова для обох (ширина смуги Найквіста). Типовий графік SINAD для DDS AD9851, показано на рисунку 6.

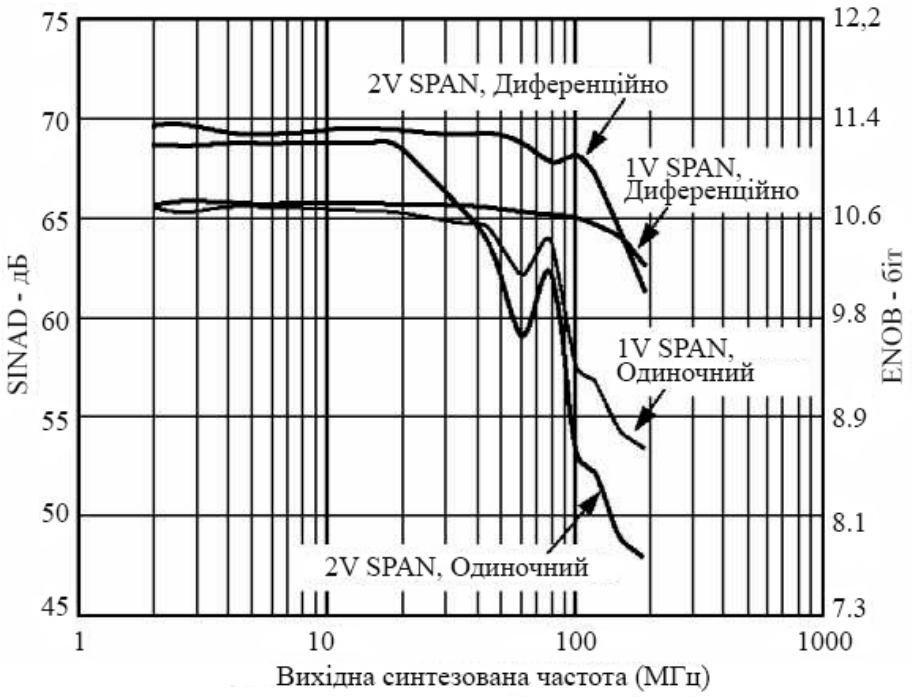


Рис. 6. SINAD і ENOB для різних вхідних повномасштабних діапазонів в AD9851 DDS

Графік SINAD показує, що характеристики синтезованих сигналів погіршуються через високочастотні спотворення і зазвичай будуються для частот, які значно перевищують частоту Найквіста, тому ми можемо визначити потужність додаткових складових без дискретизації. Такі графіки SINAD дуже корисні під час оцінки динамічних характеристик DDS. SINAD часто перетворюється в параметр ENOB, використовуючи співвідношення для теоретичного SNR ідеального N-розрядного DDS: $SNR = 6,02N + 1,76\ дБ$. Рівняння вирішується для N, а значення SINAD замінюється на SNR:

$$ENOB = \frac{SINAD - 1.76dB}{6.02}. \quad (1)$$

Потрібно звернути увагу, що у рівнянні 1 ми приймаємо повномасштабний вхідний сигнал. Якщо рівень сигналу знижується, значення SINAD та ENOB зменшуються. Тому необхідно додати поправочний коефіцієнт для обчислення ENOB при зменшених амплітудах сигналів, як показано в рівнянні 2

$$ENOB = \frac{SINAD_{вим} - 1.76dB + 20\log\left(\frac{A_n}{Aв}\right)}{6,02}. \quad (2)$$

Поправочний коефіцієнт істотно «нормалізує» значення ENOB незалежно від фактичної амплітуди сигналу.

Відношення сигнал/шум (SNR, або іноді називають SNR без гармонік) розраховується за даними ШПФ так само, як SINAD, за винятком того, що гармоніки сигналу виключаються з розрахунку, залишаючи тільки співвідношення шумів. На практиці необхідно виключити тільки перші 5 гармонік, оскільки вони домінують, а наступні вже не мають істотного впливу. Графік SNR буде погіршуватись на високих вхідних частотах, але зазвичай не так швидко, як SINAD через виключення гармонійних елементів.

Кілька специфікацій DDS посилаються на SINAD маючи на увазі SNR, тому потрібно бути уважним та обережним під час інтерпретації цих специфікацій і точно розуміти, що позначає виробник.

Математичне співвідношення між SINAD, SNR, та THD

Проаналізуємо математичні співвідношення між SINAD, SNR і THD (припускаючи, що всі вимірюються з однаковою амплітудою та частотою вхідного сигналу). У наступних рівняннях SNR, THD та

SINAD виражаються в дБ, і виводяться з фактичних числових співвідношень S/N, S/D, $S/(N+D)$, як показано нижче:

$$SNR = 20\log\left(\frac{S}{N}\right), \tag{3}$$

$$THD = 20\log\left(\frac{S}{D}\right), \tag{4}$$

$$SINAD = 20\log\left(\frac{S}{N+D}\right). \tag{5}$$

Формули 3,4 та 5 можуть бути перетворені для чисельних співвідношень *N/S*, *D/S* та *(N+D)/S* таким чином:

$$\frac{N}{S} = 10^{-SNR/20}, \tag{6}$$

$$\frac{D}{S} = 10^{-THD/20}, \tag{7}$$

$$\frac{N+D}{S} = 10^{-SINAD/20}. \tag{8}$$

Оскільки знаменники рівнянь 6, 7 та 8 всі рівні S, то корінь квадратний *N/S* і *D/S* дорівнює *(N+D)/S* наступним чином:

$$\frac{N+D}{S} = \left[\left(\frac{N}{S}\right) + \left(\frac{D}{S}\right)\right]^{\frac{1}{2}} = \left[\left(10^{-SNR/20}\right)^2 + \left(10^{-THD/20}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}, \tag{9}$$

$$\frac{N+D}{S} = \left[10^{-SNR/20} + 10^{-THD/20}\right]^{\frac{1}{2}}. \tag{10}$$

Тому *S/(N+D)* має бути рівним:

$$\frac{S}{N+D} = \left[10^{-SNR/10} + 10^{-THD/10}\right]^{\frac{1}{2}}, \tag{11}$$

а отже,

$$SINAD = 20\log\left(\frac{S}{N+D}\right) = -10\log\left[10^{-SNR/10} + 10^{-THD/10}\right]^{\frac{1}{2}}. \tag{12}$$

За допомогою рівняння 12 ми отримуємо параметр SINAD у вигляді співвідношення SNR і THD.

Аналогічно, якщо ми знаємо SINAD і THD, ми можемо отримати значення SNR наступним чином:

$$SNR = 20\log\left(\frac{S}{N}\right) = -10\log\left[10^{-SINAD/10} - 10^{-THD/10}\right]. \tag{13}$$

Аналогічно, якщо ми знаємо SINAD і SNR, ми можемо знайти значення THD наступним чином:

$$THD = 20\log\left(\frac{S}{D}\right) = -10\log\left[10^{-SINAD/10} - 10^{-SNR/10}\right]. \tag{14}$$

Важливо ще раз підкреслити, що ці відносини зберігаються, тільки якщо вхідна частота і амплітуда рівні для всіх трьох вимірів.

Висновки

У статті проаналізовано параметри цифро-аналогового перетворення у прямих синтезаторах частоти (DDS). Отримано математичні співвідношення між SINAD, SNR і THD. Наведено результати аналізу синтезованого сигналу за допомогою цих параметрів. Відношення сигнал/шум (SNR, або іноді називають SNR без гармонік) розраховується за даними ШПФ так само, як SINAD, за винятком того, що гармоніки сигналу виключаються з розрахунку, залишаючи тільки співвідношення шумів. Встановлено, що необхідно виключити тільки перші 5 гармонік, оскільки вони домінують, а наступні не мають істотного впливу.

Оскільки SINAD, SNR, ENOB, THD, THD + N і SFDR є загальними показниками динамічної продуктивності DDS, головним завданням дослідження є встановлення залежностей між цими параметрами в контексті специфікації виробника. Графік SINAD показує, що характеристики синтезованих сигналів погіршуються через високочастотні спотворення і зазвичай будуються для частот, які значно перевищують частоту Найквіста, тому ми можемо визначити потужність додаткових складових без дискретизації.

Також у роботі проаналізовано структурну схему тестової установки для аналізу ШПФ сигналу з

виходу DDS. За допомогою програми ADIsimDDS фірми Analog Devices для синтезаторів DDS досліджено типовий вихідний сигнал ШПФ для DDS AD9851 з вхідною тактовою частотою – 95 МГц.

Література

1. Kester W., „Chapter 2: Fundamentals of Sampled Data Systems“, The Data Conversion Handbook, Elsevier/Newnes, 2005, ISBN 0–7506–7841–0, pp. 3–53.

2. Макаренко В. Фазо-цифровые и частотно-цифровые синтезаторы частоты. Часть 1 / В. Макаренко // Электронные компоненты и системы. – 2012. – № 1. – С. 24–30.

3. Hank Zumbahlen, Chapter 6: Converters, Linear Circuit Design Handbook, Elsevier–Newnes, 2008, ISBN–10: 0750687037, ISBN–13: 978–0750687034, pp. 133–180.

4. Макаренко В. Компоненты для построения беспроводных устройств святи. Часть 7. Синтезаторы частоты прямого цифрового синтеза / В. Макаренко // Электронные компоненты и системы. – 2010. – № 1. – С. 34–46.

5. Полікаровських О.І. Архітектура прямого цифрового синтезатора частоти для рішень цифрового радіо / О.І. Полікаровських // Вісник Хмельницького національного університету. – 2012. – Том 3. – С. 142–146.

References

1. W. Kester, „Chapter 2: Fundamentals of Sampled Data Systems“, The Data Conversion Handbook, Elsevier/Newnes, 2005, ISBN 0–7506–7841–0, pp. 3–53.

2. Makarenko V. Fazo–tsifrovyie i chastotno–tsifrovyie sintezatoryi chastotyi. Chast 1 / V. Makarenko // Elektronnyie komponentyi i sistemyi. – 2012. – 1. – S. 24–30.

3. Hank Zumbahlen, „Chapter 6: Converters“, Linear Circuit Design Handbook, Elsevier–Newnes, 2008, ISBN–10: 0750687037, ISBN–13: 978–0750687034, pp. 133–180.

4. Makarenko V. Komponentyi dlya postroeniya besprovodnyih ustroystv svyati. Chast 7. Sintezatoryi chastotyi pryamogo tsifrovogo sinteza / V. Makarenko // Elektronnyie komponentyi i sistemyi. – 2010. – 1. – S. 34–46.

5. PolIkarovskih O.I ArhItektura pryamogo tsifrovogo sintezatora chastoti dlya rIshen tsifrovogo radIo / O.I. PolIkarovskih // Herald of Khmelnytskyi National University.– 2012. – Tom 3. – S. 142–146.

Рецензія/Peer review : 17.11.2017 р. Надрукована/Printed :12.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Мартинюк В.В.

UDC 621

K.L. HORIASCHENKO, O.E. ZEMLANSKIY
Khmelnitsky National University, Ukraine

A COMPARISON OF REFLECTOMETRY METHODS FOR LOCATION FAULT IN TELECOMMUNICATION CABLES

Aging wiring in buildings, transportation systems, consumer products and industrial machinery is among the most significant potential causes of catastrophic failure and maintenance cost in these structures. Smart wire monitoring can therefore have a substantial impact on the overall health monitoring of the system.

Well known reflectometry is commonly used for locating faults on wires and cables for a long time. This paper discuss and compares several types of reflectometry methods as time domain reflectometry (TDR), frequency domain reflectometry (FDR), mixed signal reflectometry (MSR), sequence time domain retlectometry (STDR), spread spectrum time domain reflectometry (SSTDR) in terms of their accuracy, convenience, cost, size, and ease of use.

Common problems of TDR are the inability to see small reflections and errors in the velocity of propagation are sources of errors. Other sources of errors in TDR are hardware errors – classical measurement error, where some variation in measurements is seen, even without making any changes to the wire under test, its connection.

TDR is a most hardest in hardware realization because required high-quality generator with precise stability of width and amplitude of pulses. FDR require low-frequency generator with sinusoidal waveform, but require large memory area to store data from measuring process. All existing FDR methods do not allow eliminating "blind spots" at all.

As a result, advantages and limitations of each method are outlined and evaluated for cables. The results in this paper can be extrapolated to other types of wire and cable systems.

Keywords: *electrical wiring; reflectometry; nondestructive evaluation; aircraft maintenance.*

К.Л. ГОРЯЩЕНКО, О.Е. ЗЕМЛЯНСЬКИЙ
Хмельницький національний університет, Україна

ПОРІВНЯННЯ ФАЗОВИХ РЕФЛЕКТОМЕТРІЙНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ В ЕЛЕКТРОКОМУНІКАЦІЙНИХ КАБЕЛЯХ

Старіння електропроводки в будівлях, транспортних системах, споживчих товарах та промислових машинах є однією з найважливіших потенційних причин катастрофічних збоїв та витрат на обслуговування в цих структурах. Чіткий моніторинг проводів може суттєво вплинути на загальний моніторинг стану системи.

Добре відома рефлектометрія зазвичай використовується для визначення несправностей на проводах і кабелях протягом тривалого часу. У цій роботі порівнюється рефлектометрія часового поясу (TDR), рефлектометрія частотної області (ФДР), змішана сигнальна рефлектометрія (MSR), реклектометрія часового домену послідовності (STDR), рефлектометрія часового поясу розсіяного спектра (SSTDR) з точки зору їх точності, зручності, вартості Розмір і простота використання. Переваги та обмеження кожного методу наведені та оцінені для кабелів. Результати в цьому документі можуть бути екстрапольовані на інші типи дротових та кабельних систем

Ключові слова: електропроводка; рефлектометрія; незруйнована оцінка; технічне обслуговування літальних апаратів.

1. Introduction

Aging electrical systems are prevalent in today's society. A full scale evaluation of the problem is difficult. Wiring was not normally considered in lifecycle maintenance. Over 90% of home fires are attributed to electrical fires, although it is not clear how many are due to installed wiring and how many to faulty plug-in consumer devices. In addition to the safety problem, aircraft wiring systems are a maintenance burden. For example known that between 1 million and 2 million man-hours are required at the operational level to troubleshoot and repair wiring system problems in the U.S. Navy alone each year. Highly trained technicians trouble shoot wiring problems using diagnostics methods that are many years old.

Visual inspection, the most common traditional method, was determined to be insufficient to find fault. Especially hard to find faults in hidden wires. Time domain reflectometry (TDR), another traditional method for locating faults, was fond to be enough accurate but difficult to use [1, 2, 3].

High voltage test systems are able to locate even small faults, however they are very large and expensive. Also, high voltage testing methods are able to reduce lifetime of wires or even create new faults [1, 2, 3]. That's why new methods are needed, and development funds have led to the emergence of a number of different techniques. In article described wire test methods that are suitable for handheld and compares their advantages and disadvantages.

The methods compared are the time domain refleclomeler (TDR), frequency domain reflectometer (FDR), mixed signal reflectometer (MSR), sequence time domain reflectometer (STDR), spread spectrum time domain reflectomeler (SSTDR) [4–7].

2. Test methods

2.1 Time domain reflectometry

One of the most known method – Time domain reflectometry (TDR). TDR is most commonly used method for testing wires. use a high frequency electrical signal down the wire, where it reflects from any impedance discontinuity. The reflection coefficient gives a measure of how much signal is returned.

The time or phase delay between the incident and reflected signals tells the distance to the fault, and the

observed magnitude of the reflection coefficient tells what the impedance of the fault.

Faults like open or short are observable by TDR without any problems. But soft faults like damaged insulation, etc. are generally founded not so easy. The height of the peak relative to the maximum peak height gives the reflection coefficient.

The delay between the incident and reflected voltages shows up in the location of refiectometry peaks. The distance *L* is the velocity of propagation divided by the time delay. The velocity of propagation in typical aircraft cables ranges from 0.5 to 0.8 depending on the type of cable. It is therefore very important to know the type of wire being tested. The veiocily is dependent on the size and shape of the conductors, and therefore also depends on the distance between conductors.

Common problems of TDR are the inability to see small reflections and errors in the velocity of propagation are sources of errors. Other sources of errors in TDR are hardware errors – classical measurement error, where some variation in measurements is seen, even without making any changes to the wire under test, its connection, etc.

For the reflectometry methods described below, this is generally less than 1%. Another error is connection error. Since the reflectometer must be connected to a wide variety of cables, it is not generally so easy to match the impedance of the reflectometer output with the wire. This means there will always be a reflection between the measuring board and the wire being tested. The test-lead, connectors, adapters, etc. all add to this reflection in different ways. The physical connection to the wire is not always identical, and this difference gives an error of about 30 sm with 10 meters long wire.

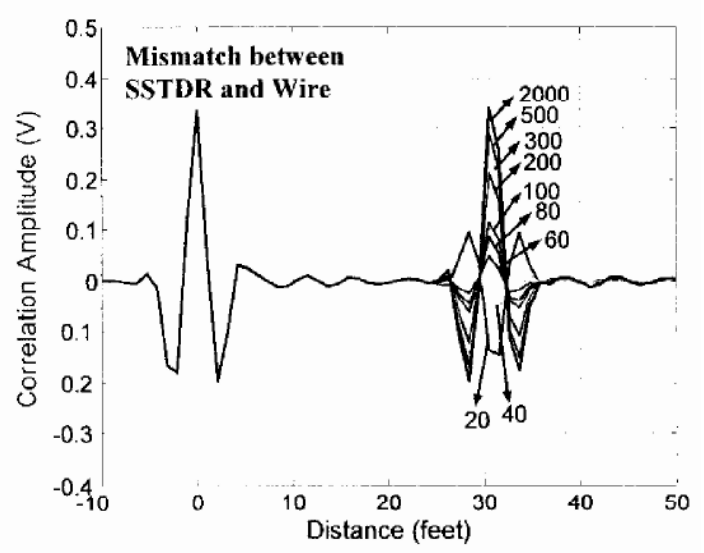


Fig. 1. Spread spectrum time domain rel]ectomelry (SSTDR) responses for different load impedances (given in ohms for a 50£2 wire). The correlation amplitude is proportion to reflection coefficient. Other reflectometry methods will have the same relative peak magnitudes, but different shapes of the pulses

Another significant source of error in reflectometry methods that is quite important to testing wires is the so-called "blind spot" for wires that are very short. This is caused by the reflected signal overlapping the incident signal, because the time delay between generating short pulse and measuring of reflections is so small.

This makes it difficult to identify the reflected signal. Two methods can be used to reduce this problem. One is to use a longer test lead to connect the reflectometer to the wire under test. This would effectively delay the reflected signal enough that the overlap can be reduced or avoided. This may be practical for handheld applications, but it is not practical for embedded applications.

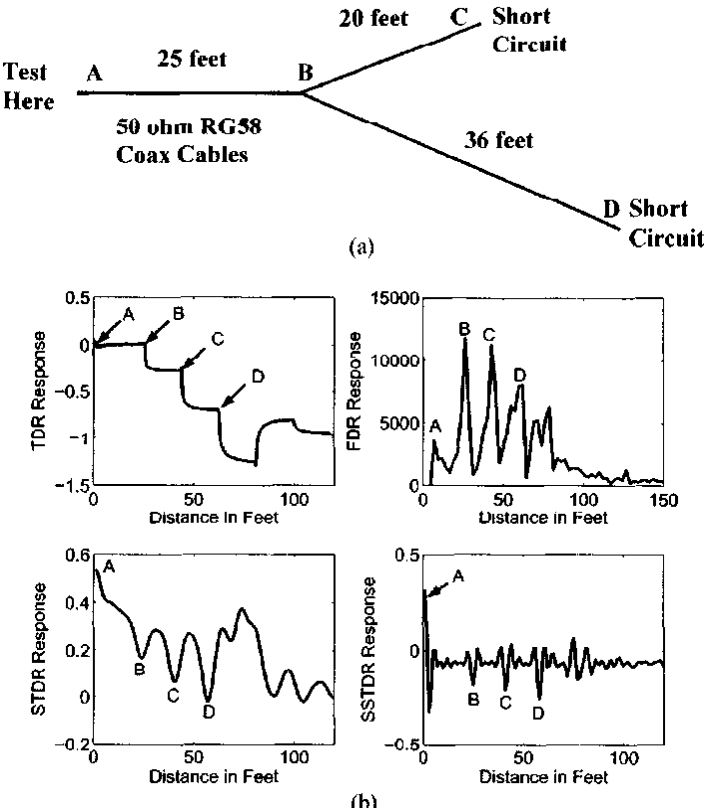


Fig. 2 (a) Network topology, (b) Reflectometry test signals of network shown (a) with TDK, FDR (MSR7 SWR), STDR, SSTDR [1, 2, 3].

2.2 Time domain reflectometry (TDR)

Frequency domain reflectometry (FDR) uses a set of stepped sine waves. Sequence time domain reflectometry (STDR) uses a pseudo noise (PN) sequence as the incident signal, and spread spectrum time domain reflectometry (SSTDR) uses a sine wave modulated PN code. Noise domain reflectometry (NDR) uses no signal at all, but rather only existing signal and its inherent noise on the wire.

The accuracy of TDR is controlled by the rise time of the pulse and the sampling rate of the receiver.

TDR requires a fast rise time pulse generator and fast sampler. It is difficult to control the problem of "blind spots" with this method, except by adding a length of cable to the test lead. But must be noted parameters of cable must be exactly equal to wire to be tested. Also this method has limited application on wires that are used. If the wire is carrying a low frequency signal (400 Hz power, for instance), it is feasible to use TDR to test the wire while it is live. The TDR signal would need to be small enough to be below the noise margin of the signals. This creates a measurement problem for the TDR, as any noise (which may be as large as or larger than the TDR signal) will corrupt the TDR trace. TDR is therefore not optimal for testing wires that are live.

TDR may be used for testing wires with multiple branches. The limitation of this (and all) reflectometry methods is that the junctions and ends of the branched network all result in reflections and multiple reflections that show up in the reflectometry trace, but it is difficult to extract the network topology from the reflectometry trace.

2.3 Frequency domain reflectometry (FDR)

Frequency domain reflectometry (FDR) sends a set of stepped-frequency sine waves down the wire. There are three types of frequency domain reflectometry that are commonly used in radar applications that are distinct in that they each measure a different sine wave properly (frequency, magnitude, phase) in order to determine distance. Related methods are also found in wire testing. These are Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) systems (which measure frequency shift), Phase Detection Frequency Domain Reflectometry (PD-FDR) systems (which measure phase shift), and Standing Wave Reflectometry (SWR) systems (which measure amplitude or nulls of the standing wave).

2.3.1 Frequency modulated carrier wave (FMCW)

FMCW systems vary the frequency of the sine wave very quickly, generally in a ramp function, and measure the frequency shift between incident and reflected signals, which can be converted to time delay knowing the speed at which the frequency is stepped. This has not been implemented for wire testing, because of limitations on speed at which the frequency can be swept and the accuracy at which the frequency shift can be measured [8].

2.3.2 Phase detection frequency domain reflectometry (PD-FDR)

Phase Detection Frequency Domain reflectometry (PD-FDR) measures the phase shift between incident and reflected waves. A voltage controlled oscillator (VCO) provides the sinusoidal signal that is stepped over a given bandwidth (f_{min}-f_{max}) with a frequency step size Δf. Reduced by a -10 dB sample of the incident sine wave is seal to the mixer, and the remainder is sent to the cable. The incident signal travels down the cable and reflects back from the load. The reflected wave is isolated from the incident wave by the second directional coupler and is sent to the mixer. The mixer "multiplies" the two sine waves, which gives signals at the sum and difference of their two frequencies. When they are at the same frequencies as they are in FDR, this difference is at zero frequency (DC). This DC voltage at the mixer output is the signal that the computer will detect and use to determine the length and load on the line. An analog-to-digital (A/D) converter used to read the mixer output effectively acts as a low-pass filter and removes the higher frequency components.

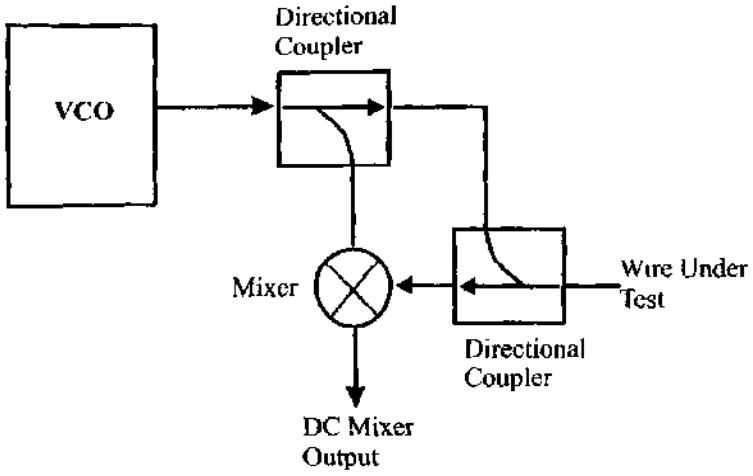


Fig. 3 PDFDR block diagram

The number of periods ("frequency") of the DC voltages collected over the injected frequency band is linearly dependent on the wire length. The Fast Fourier transform (FFT) of this collected waveform will give a Dirac delta function (single spike) at a location we will call *Peak.* The location of *Peak* in the FFT response is proportional to the length of the wire. The length is found from this peak index by:

$$L = 2L_{\max}\left(\frac{Peak - Peak(0)}{N_{FFT} - 1}\right) = \frac{1}{2}\left(\frac{Peak - Peak(0)}{N_{FFT} - 1}\right)\left(\frac{N_F - 1}{f_2 - f_1}\right)v_p \qquad (1)$$

where $Peak$ — location of the Dirac delta peak in the FFT (an integer value), Peak index for corresponding length in FFT;

v_p – velocity of propagation in the cable (m/s);

f_1 – start frequency of the FDR (Hz);

f_2 – stop frequency of the FDR (Hz);

N_{FFT} – number of frequencies in the FDR = integer[$\frac{(f_2 - f_1)}{\Delta f}$;

Δf – frequency step size for FDR (Hz)

$L_{\max}$ – maximum length shown below

N_{FFT} – number of points in the FFT (an integer value, generally 1024, 2048, 4096 or 8192)

The resolution (accuracy) of the measurements (ΔL) is given by [4]:

$$\Delta L = \frac{v_p}{\left(2N_{FFT}\Delta f\right)} \tag{2}$$

The maximum length ($L_{\max}$) that can be measured on an ideal wire is limited by the frequency step size and the Nyquist criterion:

$$L_{\max} = \frac{v_p}{4\Delta f} \tag{3}$$

This DC value is the same as for the PD-FDR, such as shown in Fig. 5. The mixer output goes into a digital to analog converter, which automatically filters out the high frequency component The DC values as a function of frequency are a sinusoidal wave whose frequency is linearly proportional to the wire length, virtually identical to the FDR responses shown in Fig. 5. The MSR is more accurate than the S WR for small reflections, however this advantage has not been found to have practical application, as it still cannot analyze the very small anomalies associated with frays or chafes. MSR is less expensive and smaller than PD-FDR, since it does not require the directional couplers. For branched networks, the MSR response includes the multiple reflections plus their sums and differences, which makes its response more complex to calculate than the PD-FDR branched network response. Limitations on the use of MSR for live wires and short length wires are virtually identical to those for PD-FDR.

The MSR system is less expensive than either the PD-FDR or SWR. It requires only a voltage controlled oscillator (VCO), mixer, and related control circuitry. It is feasible to integrate this system into a single chip and imbed it directly into the wiring system.

2.4 STDR/SSTDR

Block diagrams of Sequence Time Domain Reflectometry (STDR) (Furse, Smith, Safavi and Lo 2005) and Spread Spectrum Time Domain Reflectometry (SSTDR) are shown in Fig. 7 (Furse, *et ai* 2005, Smith 2003). STDR uses a pseudo noise (PN) code as the test signal, as shown in Fig. 8a (Furse, *et al.* 2005, Smith 2003). The PN signal can be very, very small compared with the aircraft signal on the wire (-20 dB down, for instance) and is well below the allowable noise floor of the aircraft signal shown in Figs. 8a and 8b (Furse, *et al.* 2005, Smith 2003). Although the PN code magnitude is small, it is relatively long (1023 bits, for example) and has a distinct and recognizable pattern. The correlation responses of STDR and SSTDR are shown in Figs. 8(c) and 8(d) (Furse, *et al.* 2005, Smith 2003).

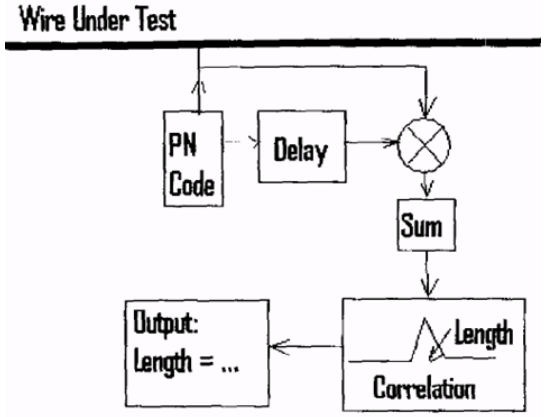


Fig. 4. Sequence (STDR) Test System. For SSTDR, the input signal is a sine wave modulated PN code

The S/SSTDR is capable of being miniaturized into a mixed signal IC, which will make it very small and likely the least expensive reflectometry system available. It is very feasible to consider imbedding this system in the wiring system. S/SSTDR is capable of analyzing branched networks, with the same limitations as FDR and TDR, that the network topology must be extracted from the multiple peaks in the reflection data.

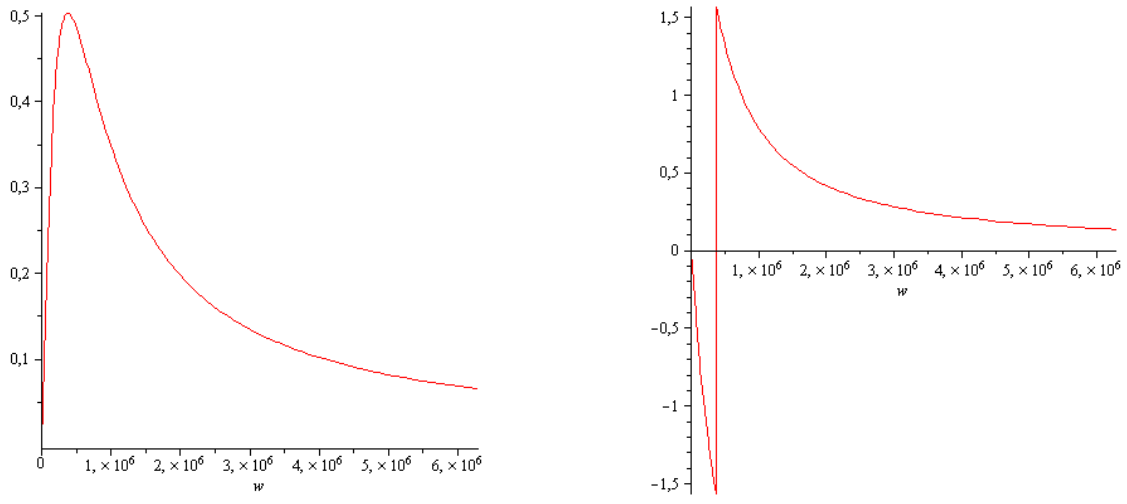
3 Phase-Frequency domain reflectometry (PFDR)

Phase-Frequency domain reflectometry uses a set of several sinusoidal signals with predefined steps [9, 10]. The term "Phase-Frequency" belong to main basis of this kind of reflectometry. In PFDR, unlike to FDR those frequencies creates reflected signals. In PFDR the main basis of measuring based on term "rotation speed of reflected signal", where rotation speed related to value of $\Omega = \frac{d\varphi}{d\omega}$, where $d\varphi_i = \varphi_2 - \varphi_1$ is a change of summary phases for corresponding frequencies $d\omega_i = \omega_2 - \omega_1$.

It is found, what in classic variants of measuring phase of reflected signal varies in wide range. So we have the following:

$$\varphi_{reflection} = \arctan\left(\frac{2\left|Z_{load}\right|\sin\left(\angle Z_{load}\right)Z_{line}}{Z_{load}^2 - Z_{line}^2}\right). \tag{4}$$

The results of modelling of equation (5) shown on figure 8.



a) **b)**

Fig. 5. Deviation of phase shift angle in range of 10 Hz to 1 MHz for lines with the following parameters:

a) $X_{load} = 25 + 5 \cdot 10^{-5} \omega \quad X_{line} = 45 + 4 \cdot 10^{-4} \omega$; **b)** $X_{load} = 1^{-4} \omega \quad X_{line} = 1 \cdot 10^{-5} \omega$

4 Conclusions

As a result, TDR is a most hardest in hardware realization. TDR require high quality pulse generator, high speed AD convertor for measuring of wear signals. Problems of connections between measuring device and wire leads to mismatch between result for the same wire and cables.

On other hand we have FDR methods. Measuring device based on FDR technology can be produced with use of less comprehensive electronics, so it can be done with several low-frequencies IC. For FDR, removing the expected incident pulse using signal processing and increasing the resolution of the Fourier transform used to analyze the FDR data reduce the minimum measurable length. For all of the reflectometry systems, it is possible to tell that there is a reflection within the minimum length, which is generally on the order of 2 feet, but not to determine accurately within this distance where the fault occurs.

The biggest problems of FDR are:

1) Result of FDR can be received as a result of FFT proceeding of some data from measuring process.
2) All existing FDR methods do not allow eliminating "blind spots" at all. To eliminate "blind spots" FDR still require additional physical wire before wire to test.
3) FDR methods based on measuring of so-called standing waves. But there is no answer how to use those standing waves (their frequencies, magnitudes and phases) in complex.

The answer based on understanding of reasons why we receive all those standing waves. And at the same time we need to proceed not signal envelope but signal states in predefined times.

An important ability of the reflectometry systems is the ability to run on live systems to detect intermittent faults. For FDR is possible to use predefined range of waves to test. For TDR this can be done only with filter.

Frequency domain reflectometry systems are limited to low frequency circuits, as they would interfere with the higher frequency lines. Even for the low frequency circuits, their signal to noise ratio (SNR) is not as good as the STDR. The same holds true for TDR. S/SSTDR systems are therefore the best for locating intermittent faults or for real time testing of live circuits.

Another important aspect of reflectometry systems for which solutions are just beginning to emerge is analysis of branched networks, since many of the power distribution systems that are of prime importance to test are extensively branched.

All of the reflectometry systems have the potential to locate faults on branched networks, since individual peaks or steps will be seen in their response for each reflection point. Reflectometry responses from branched networks are often too complex to interpret by hand.

Some aspects of networks will always be impossible to resolve with a single point measurement. For instance, when one of two identical arms breaks, it will be possible to tell how far away the break is, but it will not be possible to tell which arm is broken. When an open and short circuit occur at the same distance from the test system, the reflections cancel each other out and appear completely invisible. In cases such as these, multiple test points on the same system will be needed, which will in turn require the coordination and communication of data for analysis.

Smart imbedded test systems for wiring hold the promise of revolutionizing the way large wiring systems arc designed and maintained. The ability to precisely identify and locate wiring faults remotely enables monitoring, diagnosis, control, and potentially even prognosis of degrading systems. Critical elements including sensors that are small enough to be imbedded, that are capable of locating faults on live systems, and that can be used on branched networks are all rapidly emerging and are showing excellent results.

Not all network analysis can be completed from a single test point, which means that multiple sensors need to communicate and work together. The complexity of today's wiring systems means that there could be potentially thousands of distributed sensors in the highly lossy, highly multipath communication environment of a building or plane. Communication can be efficiently done on the wires being tested, in some cases potentially with the same sensors that are used to test the wires, but if the wire breaks, then critical information would be lost.

References

1. Waddoups, Brent (2001), "Analysis of reflectometry for detection of an aircraft wiring insulation", MS Thesis, Utah State University, Logan, Utah, (all theses and dissertations in this paper can be obtained from: www.lib.umi.com).

2. Schmidt, Mark (2002), "Use of TDR for cable testing", MS Thesis, Utah State University, Logan, Utah.

3. Jani, Alok (2003), "Location of small frays using TDR," MS Thesis, Utah State University, Logan,Utah, 2003.

4. Furse, Cynthia, Chung, You Chung, Dangol, Rakcsh, Nielsen, Marc, Mabey, Glen, Woodward, Raymond, (2003), "Frequency domain reflectometry for on board testing of aging aircraft wiring", IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, 306–315, May.

5. Chung, You Chung, Turse, Cynthia, Pruitt, Jeremy, (2005) "Application of phase detection frequency domain reflectometry for locating faults in an F-I8 flight control harness", IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, 47(2), 127–114.

6. Tsai, P., Lo, C., Chung, Y. C. and Furse, C. M. (2005), "Mixed signal reflectometer for location of faults on aging wiring", IEEE Sensor Journal, 5(6), 1479–1482.

7. Furse, C., Smith, P., Safavi, M. and Lo, C. (2005), "Feasibility of spread spectrum sensors for location of Arcs on live wires", IEEE Sensors J., 5(6), 1445–1450.

8. Furse, C. and Kamdar, N. (2002), "An inexpensive distance measuring system for navigation of robotic vehicle", Microwave and Optical Tech. Letters, 33(2). 84–97, April.

9. Horiashchenko Kostyantyn. Using complexity of phase method for determining distances to the damages in wiring lines. Khmelnytskyi. Measuring and Computing Devices in Technological Processes. 2015. Issue 1. P. 118–121.

10. Horiashchenko Kostyantyn. Spectral components definition of the signal with harmonic signal noninteger period components / K. Horiashchenko, O.I. Maydanets // International conference "Measuring and Computing Devices in Technological Processes". – Odesa, June, 6-12, 2014. – P. 71–72.

Рецензія/Peer review : 21.11.2017 р. Надрукована/Printed :09.12.2017 р.
Рецензент: к.т.н., доц. Одегов М.І.

УДК 004.773.2

О.В. МАСТИКАШ
Національний університет «Львівська політехніка»

ОСОБЛИВОСТІ КЛАСИФІКАЦІЇ ТА АНАЛІЗУ ВІРТУАЛЬНИХ СПІЛЬНОТ

Початковим етапом аналізу даних віртуальної спільноти є етап отримання структурованих даних. В роботі здійснено аналіз особливостей структури віртуальних спільнот, досліджено їхній функціонал. Охарактеризовано спільні риси віртуальних спільнот та наведені унікальні характеристики окремих віртуальних спільнот. Наведено структуру наповнення сторінки користувача спільноти.

Ключові слова: віртуальна спільнота, користувач віртуальної спільноти, профіль користувача, вузли

O.V. MASTYKASH
Lviv Polytechnic National University

FEATURES OF CLASSIFICATION AND ANALYSIS OF VIRTUAL COMMUNITIES

The initial stage of analyzing the data of the virtual community is the stage of obtaining structured data. In this work an analysis of the features of the structure of virtual communities was carried out, their functional was investigated. Characterized by the common features of virtual communities and the unique characteristics of individual virtual communities. The structure of the page of the user's community is developed. Characteristic features of virtual communities are the ability to establish different types of relationships between community members, the ability to find their members. The main purpose of the work is to analyze and structure the user data of virtual community members for the further design and implementation of the software algorithmic complex of research of the virtual community. Virtual communities are different from each other by subject, general structure, content organization, functionality. The main feature of the virtual community is the mandatory presence of the user's own registered for a filled account, which contains information about it. The structure of such fields in all communities is practically the same: the name and the last name, photos, the ability to indicate sex, family status, birthday, city of residence (birth), contact information (mobile and home phone, email address, personal page on the Internet).), detailed information about education (with the enumeration of the educational institutions in which the user studied), as well as personal information such as human activities, interests, interests and hobbies. Fill the page of the user's virtual community is as much as possible with his personal data.

Keywords: virtual community, virtual community user, user profile, nodes

Вступ

Характерними особливостями віртуальних спільнот є можливість встановлення різнотипних зв'язків між учасниками спільноти, можливість пошуку їхніх учасників [1]. Користувач має можливість створювати персональну сторінку, у якій розповісти про свої інтереси (вказати свої захоплення та інтереси, школу, вищий навчальний заклад, улюблені заняття та багато іншого), свій досвід роботи , цілі і вказати іншу інформацію. Віртуальна спільнота пропонує наступний функціонал:

- формування та збереження особистої сторінки із контактними даними учасника спільноти;
- формування списку колег (друзів) користувача;
- формування своїх записів та перегляд записів інших користувачів;
- спілкування із іншими учасниками;
- використання сторонніх сервісів;
- можливість обмеження спілкування з небажаними персонами і т. д.

За цими даними акаунт користувача зможуть знайти як і інші учасники, так і спеціалізоване програмне забезпечення. На сьогоднішній день існує багато механізмів та програмно алгоритмічних комплексів пошуку користувачів ресурсу і отримання контенту персональної сторінки учасника віртуальної спільноти.

Аналіз досліджень та публікацій

У статті [2] проаналізовано зміст поняття "соціальна мережа"; простежено основні етапи виникнення, розвитку, поширення і використання соціальних мереж; виділено їх функції та особливості в сучасний період; наведено класифікацію соціальних мереж та їхній вплив на сучасне суспільство.

Згідно досліджень [3–5] віртуальні спільноти розділяються на 6 основних груп:

- **Віртуальні спільноти для спілкування.** Яскравими представниками цієї групи спільнот є: Facebook (*www.facebook.com*). Twitter (*www.twitter.com*). Google+ (*www. plus.google.com*).
- **Мультимедійні віртуальні спільноти.** Орієнтовані на розповсюдження та обмін мультимедійної інформації. Найпоширеніші сервіси: YouTube (*www.youtube.com*), Flickr (*www.flickr.com*), Shots (*www. shots.com*), Periscope (*www.periscope.tv*). Instagram (*www.instagram.com*).
- **Професійні віртуальні спільноти.** Яскравими представниками цієї групи спільнот є: LinkedIn (*linkedin.com*), Xing (*www.xing.com*), Sumry (*www.sumry.me*), Slack (*www.slack.com*).
- **Інформаційні віртуальні спільноти.** Представники: HGTV Discussion Forums (*ths.gardenweb.com*), Do-It-Yourself Community (*doityourself.com*).
- **Освітні віртуальні спільноти**. Представники: The Student Room Group (*thestudentroom.co.uk*), ePALS School Blog (*www.epals.com*).
- **Академічні віртуальні спільноти**.. Яскравим представником цієї групи спільнот є ресурс Academia.edu (*www.academia.edu*).

Формулювання цілей. Основною метою роботи є здійснення аналізу та структурування користувацьких даних учасників віртуальних спільнот для подальшого проектування та реалізації програмного алгоритмічного комплексу дослідження віртуальної спільноти. Класифікування віртуальних спільнот відповідно до структури контенту, частоти зміни даних, можливості їхнього отримання

програмним забезпеченням.

Характерні особливості структури віртуальних спільнот

Кожна віртуальна спільнота є унікальною. Віртуальні спільноти відрізняються один від одного тематикою, загальною структурою, організацією контенту, функціоналом [6]. Навіть, якщо ідея віртуальної спільноти була запозичена із іншої віртуальної спільноти, все рівно структура DOM дерева її сторінок є унікальною як і саме наповнення. Не зважаючи на таке різноманіття можна виділити основні принципи більшості віртуальних спільнот:

- Реєстрація та авторизація.
- Ідентифікація (кожен учасник спільноти має можливість наповнити особисту сторінку, яка унікально його ідентифікує).
- Присутність на сайті (учасники спільноти мають можливість побачити користувачів, які зараз є присутні на сайті).
- Зв'язки (організація відносин між користувачами (друзі, члени сім'ї, друзі друзів і т. д.)).
- Комунікація (можливість контактувати із іншими учасниками спільноти).
- Спільноти (формування груп користувачів за інтересами).
- Активність (Можливість відслідковування діяльності користувача в межах віртуальної спільноти).
- Обмін (можливість ділитися файлами та посиланнями на ресурси).

Віртуальні спільноти є величезною базою даних із найрізноманітнішою інформацією про сотні мільйонів людей по всьому світу, яка до того ж непогано структурована. Чим більше людина генерує контенту у віртуальній спільноті, тим більше інформації про неї можна зібрати. За підрахунками дослідницької фірми Nielsen, за рік (з липня 2011 по липень 2012) мешканці США провели на сайтах соціальних мереж 121 млрд хвилин. Це на 37% більше, ніж в передньому році. Третина цього часу була витрачена на роботу з додатками.

Віртуальні спільноти, по суті, на 80% складаються із особистих сторінок користувачів. Решта контенту – це реклама, новини, які дублюються на сторінках користувачів, та інші записи.

Основною особливістю віртуальної спільноти є обов'язкова наявність у користувача власного зареєстрованого на наповненого профілю, у якому міститься інформація про нього. Структура таких полів в усіх спільнотах є практично однаковою: наявність ім'я та прізвища, фотографії, можливість вказання статі, сімейного стану, дня народження, міста проживання (народження), контактної інформації (мобільний і домашній телефон, електронна адреса, особиста сторінка в інтернеті), детальної інформації про освіту (з перерахуванням навчальних закладів, в яких навчався користувач), а також особиста інформація, така, як діяльність людини, його інтереси, зацікавлення та хобі.

Класифікування віртуальних спільнот

Для аналізу даних сторінки користувача віртуальної спільноти загальноприйнята класифікація не підходить. Потрібно реалізувати класифікацію спільнот відповідно до структури контенту, частоти зміни даних, можливості їхнього отримання:

- **Доступність контенту без авторизації**. Під час написання системи аналізу контенту ця характеристика є впливає на можливість отримання контенту сторінки програмним забезпеченням, яке не є зареєстроване у віртуальній спільноті або немає токену для роботи із нею:

1. контент повністю доступний;
2. контент недоступний;
3. доступний частково.

- **По зміні структури дерева сторінки**. Впродовж життєвого циклу віртуальної спільноти її структура та архітектура можуть змінюватися:

4. статичні (тобто структура сторінки користувача не змінюється зовсім, або ж змінюється не періодично і несуттєво);
5. динамічні (структура сторінки змінюється періодично).

- **По візуалізації даних.**

6. інформаційна повнота опису користувача (повнота опису профілю користувача, присутність ключових вузлів для унікальної ідентифікації користувача);
7. із частковим описом користувача;
8. без наповненої особистої інформації.

Ключові вузли сторінки користувача віртуальної спільноти

Основними вузлами сторінки користувача віртуальної спільноти є особиста інформація користувача, список друзів та спільнот, список дописів, перелік мультимедійних даних користувача, список дій над дописами користувача, інша інформація:

$$User(VC_i) = \begin{Bmatrix} PersonalIn\,fo(VC_i), Friends(VC_i), Posts(VC_i), \\ Multimedia(VC_i), Actions(VC_i), Other(VC_i) \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

де $User(VC_i)$ – профіль користувача, $PersonalInfo(VC_i)$ – особиста інформація користувача, $Friends(VC_i)$ – друзі та спільноти користувача, $Posts(VC_i)$ – дописи користувача, $Multimedia(VC_i)$ – мультимедійні дані користувача, $Actions(VC_i)$ – дії над дописами користувача, $Other(VC_i)$ – інша інформація

$$PersonalIn\,fo(VC_i) = \begin{Bmatrix} Photos(VC_i), Interests(VC_i), Works(VC_i), \\ Contacts(VC_i), Education(VC_i) \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

де *Photos*(VC_i) – фотографії, розміщені у користувача на сторінці, *Interests*(VC_i) – зацікавлення, *Works*(VC_i) – інформація про зайнятість користувача, *Contacts*(VC_i) – контактна інформація, *Educations*(VC_i) – список освітніх закладів, у яких навчався (навчається) користувач

$$Friends(VC_i) = \{Potential(VC_i), ByInterests(VC_i), OffOn(VC_i)\}, \quad (3)$$

де *Potential*(VC_i) – потенційні друзі, *ByInterests*(VC_i) – друзі за інтересами, *OffOn*(VC_i) – друзі онлайн/оф лайн

$$Posts(VC_i) = \{Public(VC_i), \Pr ivate(VC_i), ByCategory(VC_i)\}, \quad (4)$$

де *Public*(VC_i) – загальнодоступні дописи користувача, *Private*(VC_i) – приватні дописи користувача, *ByCategory*(VC_i) – дописи користувача розділені по категоріям

$$Multimedia(VC_i) = \{Graphic(VC_i), Media(VC_i), Other(VC_i)\}, \quad (5)$$

де *Graphic*(VC_i) – зображення, *Media*(VC_i) – медіа файли, *Other*(VC_i) – інша мультимедійна інформація

$$Actions(VC_i) = \{Likes(VC_i), Comments(VC_i), Publics(VC_i)\}, \quad (6)$$

де *Likes*(VC_i) – вподобання користувача (користувачів), *Comments*(VC_i) – коментарі, *Publics*(VC_i) – поширення записів користувача

На рис. 1. зображено структуру наповнення сторінки користувача віртуальної спільноти. Користувач віртуальної спільноти, в окремому розділі, має можливість наповнити свій профіль інформацією про себе. Фотографія користувача є невід'ємною частиною профілю [7]. В таких спільнотах, як Facebook, LinkedIn, google+, Instagram зберігається історія завантажених фотографій, є можливість ділитися особистими фотографіями із іншими користувачами спільноти. Така інформація, як інтереси, освіта, місце роботи та контакти присутня у більшості віртуальних спільнот. Але, наприклад, у таких віртуальних спільнотах, як YouTube, Academia.edu її немає.

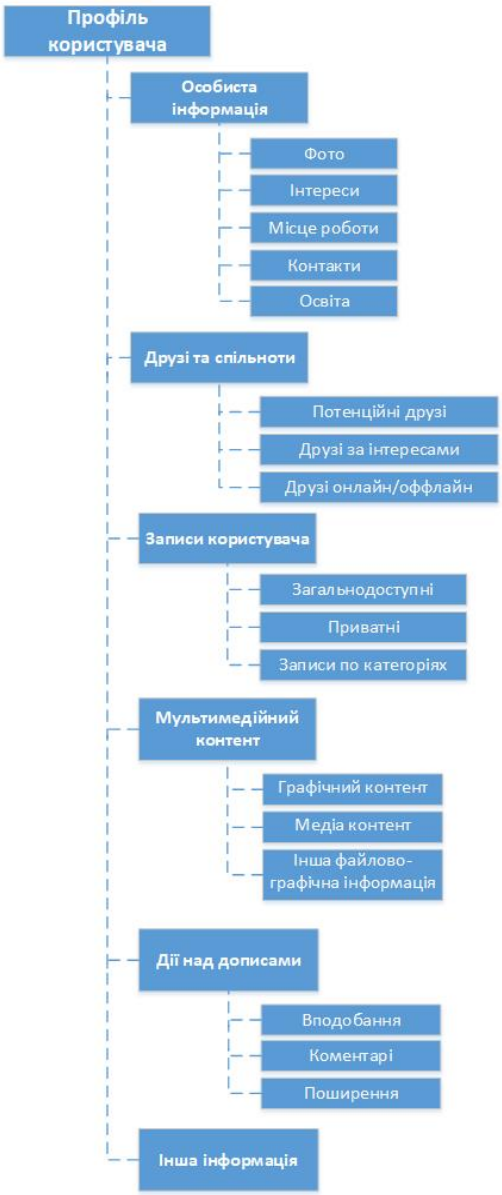


Рис. 1. Структура наповнення сторінки користувача віртуальної спільноти

Як уже було досліджено [8] користувачі віртуальних спільнот мають можливість об'єднуватися (добавляти друзів, підписуватися на новини, створювати та добавлятись до спільнот) і формувати соціальні графи. Розділи «друзі», «спільноти» присутні в усіх віртуальних спільнотах, тільки у різних спільнотах вони можуть називатися по-різному: друзі, колеги, підписники, групи, спільноти, фоловери і так далі. Переважно друзі користувача ранжуються відносно частоти спілкування, обміну контенту чи перегляду записів, що дозволяє дослідити таку характеристику, як близькість відносин між учасниками віртуальної спільноти. Але і бувають складніші підходи до ранжування зв'язків між учасниками спільноти, наприклад, віртуальна спільнота фейсбук використовує спеціальні алгоритми для ранжування друзів.

В профілі користувача присутній розділ «записи», у яких користувач має можливість поширювати цікаву йому інформацію. У віртуальній фейсбук спільноти «записи» – це світлини, на YouTube – канал із відеофайлами, і так далі. Кожен запис користувача інші учасники можуть вподобати, поділитися ним, залишити коментар, відкривати до нього різноманітні дискусії, що дозволяє сформувати загальну думку про той чи інший запис.У більшості віртуальних спільнот присутня реклама. Спільнота рекомендує книги або фільми, або статті, базуючись на попередніх діях користувача. Здійснюється ідентифікація рекомендованих товарів або послуг, які можуть зацікавити користувачів. Для реалізації такого функціоналу часто застосовується машинне навчання. Наприклад, сервіс Amazon.com застосовує рекомендаційні техніки, грунтуючись на покупках і активностях користувачів, Amazon рекомендує книги та інші речі які можуть зацікавити користувача. Віртуальні спільноти, такі як Фейсбук, використовують варіанти рекомендованих технік для виявлення людей, які найбільш підходять під визначення "потенційний друг".

На відміну від звичайного сайту, блогу або форуму, яку людина може як завгодно наповнити, сторінки віртуальних спільнот, як правило стандартизовані [9], що забезпечує мінімальну варіативність оформлення сторінки. Більш того, адміністратори віртуальних спільнот додатково слідкують за достовірністю наповненої інформації, а також за її строгою відповідністю розділам профілю (яскравим представником є віртуальна спільнота facebook.com). Наприклад, відслідковується достовірність імен та

прізвищ. У цих полях не допускається використання псевдонімів замість імен і прізвищ. Крім того, адміністратори мереж стежать за реальністю розміщуваних фотографій, блокуючи сторінки користувачів, що видають чужі фотографії за свої. Таким чином, особливістю більшості віртуальних спільнот є максимальна відповідність профілю користувача до його особистих даних, тобто в соціальних мережах люди під своїми реальними іменами, показуючи свої реальні фотографії, спілкуються такими ж реальними людьми.

Висновки

У статті виділено основні ознаки учасників віртуальних спільнот та досліджено специфіку ранжування графів користувачів. Виділено основні принципи віртуальних спільнот. Зокрема одним із основних принципів є комунікація, тобто можливість користувачів спілкуватися між собою, обмінюватися текстово-графічною інформацією, оцінювати дописи, залишати свої враження про записи. У роботі досліджено та охарактеризовано структуру контенту сторінки учасника віртуальної спільноти, а саме виділено ключові вузли, що дає можливість в подальшому здійснити більш якісний аналіз віртуальної спільноти. Здійснена класифікація віртуальних спільнот по характеристикам, які є ключовими для машинного аналізу сторінки користувача.

Література

1. Trach O., Fedushko S. Development and Exploitation of Software Complexof Virtual Community Life Cycle Organization. International Journal of Computer Science and Business Informatics. – Volume 17. – Issue 1. – 2017. – pp. 1-11.

2. Готько О. Соціальні Інтернет-мережі та віртуалізація суспільного життя / Готько О., Чайковська О., Наливайко Н. // Молодь і ринок. – 2016. – № 2. – С. 94–98.

3. Турчин А. В. Класифікація соціальних мереж / Турчин А. В. – К. : КНТУ, 2016.

4. Fedushko S. S. Застосування апарату нечітких множин для класифікації учасників віртуальної спільноти / Fedushko S. S. – 2013.

5. Пелещишин А.М. Аналіз існуючих типів віртуальних спільнот у мережі інтернет та побудова моделі віртуальної спільноти на основі веб-форуму / А.М. Пелещишин, Р.Б. Кравець, Ю.О. Сєров // Інформаційні системи та мережі: Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2011. – № 699. – С. 212–221.

6. Trach O., Peleshchyshyn A. Development of directions tasks indicators of virtual community life cycle organization. Proceedings of the XIth International Scientific and Technical Conference "Computer Sciences and Information Technologies" (CSIT-2017). – Lviv, 05-08 September 2017. – 2017. – P. 127–130.

7. Федушко С.С. Аналіз архітектури та сучасних тенденцій розвитку віртуальних спільнот / С.С. Федушко // Інформаційні системи та мережі : [збірник наукових праць]. – Львів, 2011. – № 699. – С. 362–375.

8. Korobiichuk I., Fedushko S., Juś A., Syerov Y. Methods of Determining Information Support of Web Community User Personal Data Verification System. In: Szewczyk R., Zieliński C., Kaliczyńska M. (eds) Automation 2017. ICA 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing. – Springer International Publishing, 2017.– Volume 550. – P. 144–150.

9. Syerov Yu. Effect of Implementation of improved Methods of the Life Cycle Stages Organisation to the Online Community Management / Yu. Syerov, O. Trach, S. Fedushko // International Journal of Computational Research and Development. – Volume 1. – Issue 1. – 2016. – P. 1–5.

References

1. Trach O., Fedushko S. Development and Exploitation of Software Complexof Virtual Community Life Cycle Organization. International Journal of Computer Science and Business Informatics. - Volume 17 - Issue 1 - 2017 - pp. 1-11.

2. Gotko, O., Tchaikovsky, O., Nalyvayko, N. Social Internet Networks and Virtualization of Public Life. Youth and Market, 2016, 2: 94-98.

3. Turchin, A.V. Classification of social networks. 2016. PhD Thesis. KNTU

4. Fedushko, S. S. Application of the apparatus of fuzzy sets for the classification of participants in the virtual community. 2013

5. Peleschyshyn AM Analysis of existing types of virtual communities on the Internet and building a virtual community model based on a web forum / A.M. Peleschyshyn, RB Kravets, Yu.O. Serov // Information systems and networks: The Bulletin of the Lviv Polytechnic National University. - 2011 - No. 699. - P.212-221.

6. Trach O., Peleshchyshyn A. Development of directions tasks indicators of the virtual community life cycle organization. Proceedings of the XIth International Scientific and Technical Conference "Computer Sciences and Information Technologies" (CSIT-2017). - Lviv, 05-08 September 2017 - 2017. - P. 127-130.

7. Fedusha S.C. Analysis of Architecture and Modern Trends in the Development of Virtual Communities / SS Fedushko // Information systems and networks: [collection of scientific works] - Lviv, 2011. № 699. - P.362-375.

8. Korobiichuk I., Fedushko S., Ju A., Syerov Y. Methods of Determining Information Support for the Web Community User Personal Data Verification System. In: Szewczyk R., Zieliński C., Kaliczyńska M. (eds) Automation 2017. ICA 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing. - Springer International Publishing, 2017.- Volume 550.- pp. 144-150.

9. Syerov Yu. Effect of the Implementation of the Improved Methods of the Life Cycle Stages Organizing the Online Community Management / Yu. Syerov, O. Trach, S. Fedushko // International Journal of Computational Research and Development. - Volume 1 - Issue 1 - 2016 - pp. 1-5.

Рецензія/Peer review : 02.11.2017 р. Надрукована/Printed :02.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Пелещишин А.М.

УДК 62-526

В.І. СТЕЦЮК, В. А. НІКІТОВ
Хмельницький національний університет

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЛІФТОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ ШЛЯХОМ ВВЕДЕННЯ СИГНАЛУ ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ

В роботі розглянуто проблематику експлуатації ліфтових установок з безредукторним електроприводом на базі частотно-керованого тихохідного асинхронного двигуна. Встановлено, що використання тихохідного асинхронного двигуна в безредукторному електроприводі дозволяє мінімізувати необхідну потужність перетворювача частоти, що покращує техніко-економічні показники електроприводу. Безредукторний електропривод у порівнянні з редукторним має значно більший сумарний момент інерції, що доведено відповідними розрахунками для прямого та поліспастного підвісу. Проведено випробування на діючих ліфтових установках із використанням різних типів частотних перетворювачів. Здійснено підбір оптимальної конфігурації та розроблено методику налаштування безредукторних електроприводів на базі частотно-керованого тихохідного асинхронного двигуна. Надано рекомендації з усунення основних недоліків даного типу лебідок. За рахунок вибору частотного перетворювача та введення сигналів зворотного зв'язку вдалося досягнути підвищеної комфортності пересування ліфтів за рахунок високої плавності ходу і забезпечення точності зупинок. Це дозволяє значно скоротити час пуско-налагоджувальних робіт, знизити їх собівартість та ефективніше використовувати дані типи електроприводів.

Ключові слова: ліфт, двигун, лебідка, частотний перетворювач, струм, напруга, швидкість, диференціальні рівняння, момент інерції, система керування, енкодер.

V.I. STETSYUK, V.A. NIKITOV
Khmelnytsky National University

IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE OPERATION OF LIFTING CONVERTERS OF FREQUENCY BY INTRODUCING THE FREQUENCY COMMUNICATION SIGNAL

In the paper the problems of operation of elevator units gearless winch electric drive on the basis of a frequency controlled, slow-moving asynchronous motor are considered. The use of an asynchronous motor for constructing a gearless electric drive of an elevator is a non-standard solution and, according to the authors of the transitional stage, to the creation of modern synchronous motors. However, the practice of using such a winch showed that this design has a number of disadvantages, among which the main is the difficulty of management and the problem of precise stops. The work outlines the directions for overcoming these shortcomings; the mathematical substantiation of the non-inductive asynchronous slow-moving engines has been carried out. It is established that the use of a slow-moving asynchronous motor in a gearless electric drive allows minimizing the necessary power of the frequency converter, which improves the technical and economic parameters of the electric drive. The gearless electric drive, in comparison with the gearbox, has a much larger total moment of inertia, which is proved by the corresponding calculations for the direct and polispast suspension. The ratio of the total moment of inertia of the electric drive to the moment of inertia of the engine with a gear motor is (2,5-6): 1. With the use of gearless winches, this ratio is (40-60):1 at the polispast and (100-128):1 with a straight suspension. It is established that when using a gearless electric drive with a slow-moving asynchronous motor, the kinetic energy of the elevator at a nominal speed is 5-6 times less than when using a gear motor with a two-speed asynchronous motor. Tests on existing lift installations using different types of frequency converters have been performed. The selection of the optimal configuration was made and the method of setting the gearless electric drives on the basis of the frequency controlled, slow-moving asynchronous motor was developed. The recommendations for eliminating the main drawbacks of this type of winches are given. Due to the choice of the frequency converter and the input of feedback signals, it was possible to achieve increased comfort of the movement of elevators due to high smoothness of the course and ensuring the accuracy of stops. This can significantly reduce the time of commissioning, lower their cost and more efficient use of current types of electric drives.

Keywords: elevator, engine, winch, frequency converter, current, voltage, speed, differential equations, moment of inertia, control system, encoder.

Вступ

Сучасна міська забудова немислима без використання ліфтової техніки. За даними Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, кількість ліфтів в Україні на сьогоднішній день складає майже 86 тис. штук. Зосереджено дане обладнання в основному в Києві та інших великих містах з висотною забудовою (рис. 1). Граничний термін експлуатації згідно [1–3] складає 25 років, після чого повинна здійснюватися модернізація або заміна ліфтового обладнання. В даний час з перевищенням граничних термінів використовується більше 60% українських ліфтів.

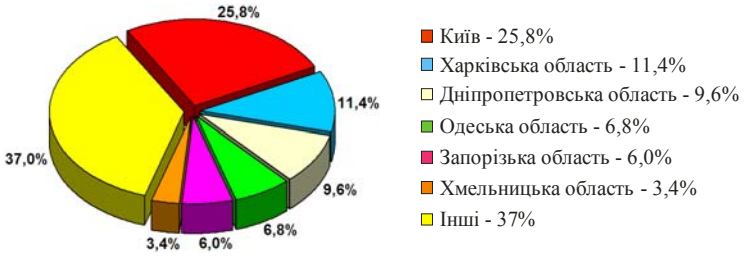


Рис. 1. Структура парку ліфтів в Україні станом на 2017 рік

Ліфтове обладнання, представлене на українському ринку, має як вітчизняне, так і імпортне походження. Поставки ліфтів здійснюються з Білорусії (ОАО "Могилевлифтмаш"), Росії (ПАО "КМЗ", ОАО "Щербинский лифтостроительный завод") Китаю (SJEC, KOYO), Туреччини ("HAS", "SAHLIFT"), Польщі ("PILAWA") та інших країн таких відомих торговельних марок, як "OTIS", "SCHINDLER", "ThyssenKrupp",

"KLEEMANN" і "KONE".

Основна частина

Важливим елементом ліфта є електропривод. Найчастіше це редукторні асинхронні одношвидкісні або асинхронні двошвидкісні лебідки. Такі електроприводи широко використовуються дотепер, однак мають ряд істотних недоліків технічно-економічного характеру: великі масо-габаритні показники, значне споживання електроенергії та низький ККД, потребують регулярного технічного обслуговування (заміна масла, ущільнювальних сальників, тощо).

Сучасним напрямком розвитку приводної техніки є використання безредукторного електроприводу, позбавленого зазначених недоліків. Закордонні безредукторні електроприводи виготовляють із використанням синхронних двигунів з постійними магнітами. Однак у нашій країні широке застосування одержали безредукторні електроприводи, виконані на базі асинхронних двигунів (АД) вітчизняного виробництва [4].

У відповідності зі сказаним, метою даної роботи є вдосконалювання техніко-економічних показників ліфтових установок з безредукторним електроприводом на базі частотно-керованого тихохідного асинхронного двигуна, дослідження особливостей такого електроприводу і розробка методики його розрахунку.

До переваг регульованого безредукторного електроприводу в порівнянні з нерегульованим редукторним можна віднести: відсутність редуктора, більш висока комфортабельність ліфта, зменшення рівнів шуму та вібрацій, енергозбереження, спрощення та здешевлення обслуговування електроприводу, скорочення розмірів машинного приміщення, та ін.

Найважливішими вимогами до електроприводу ліфта, обладнаного безредукторною лебідкою на основі тихохідного асинхронного двигуна є забезпечення точної зупинки і плавності руху. Точність автоматичної зупинки кабіни ліфта в експлуатаційних режимах роботи не повинна бути вище і нижче поверхової площадки більш ніж на 20 мм; у випадку одночасної роботи дверей кабіни і шахти ця величина може бути збільшена до 35 мм [1–3]. Недостатня точність зупинки знижує продуктивність ліфта, зменшується комфортабельність і безпека його використання. А відхилення робочої швидкості руху кабіни від номінальної повинно бути в межах ±15% [2].

Рух кабіни пасажирського ліфта відбувається за оптимальним законом, якщо ліфт забезпечує максимальну продуктивність при дотриманні необхідних умов комфортності, мінімум первісних і експлуатаційних витрат і має обмежену по максимуму швидкість руху кабіни. У цьому випадку оптимальна діаграма руху кабіни (рис. 2) має однакові по тривалості інтервали пуску і зупинки, протягом яких прискорення і ривок швидкості не перевищують максимально припустимих значень, і інтервал рівномірного руху, протягом якого швидкість руху кабіни не перевищує максимального значення. Режим роботи електроприводу ліфта характеризується частими ввімкненнями і вимкненнями. При цьому можна виділити наступні етапи руху:

- стартове прискорення електродвигуна;
- рух зі сталою рівномірною швидкістю;
- зменшення швидкості при підході до поверху призначення (безпосередньо до нуля або до малої швидкості дотягування);
- гальмування до повної зупинки кабіни ліфта на поверсі призначення з необхідною точністю.

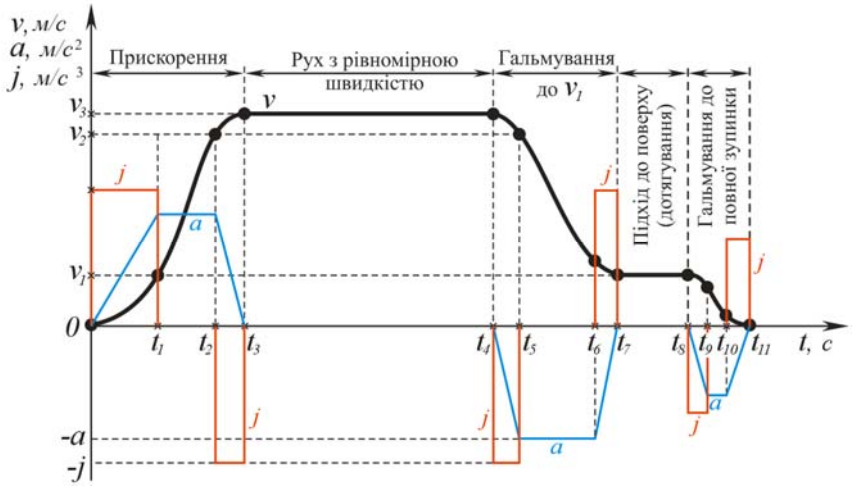


Рис. 2. Оптимальна діаграма руху кабіни ліфта: *v* – швидкість; *a* – прискорення; *j* – ривок

Дотримання оптимальності руху кабіни в істотній мері, залежить від структури електроприводу і системи його керування і, в основному, полягає в обмеженні прискорень *a* кабіни та їх похідних – ривків *j*:

$$j = \frac{da}{dt} = \frac{d^2v}{dt^2} = \frac{d^3r}{dt^3}, \quad (1)$$

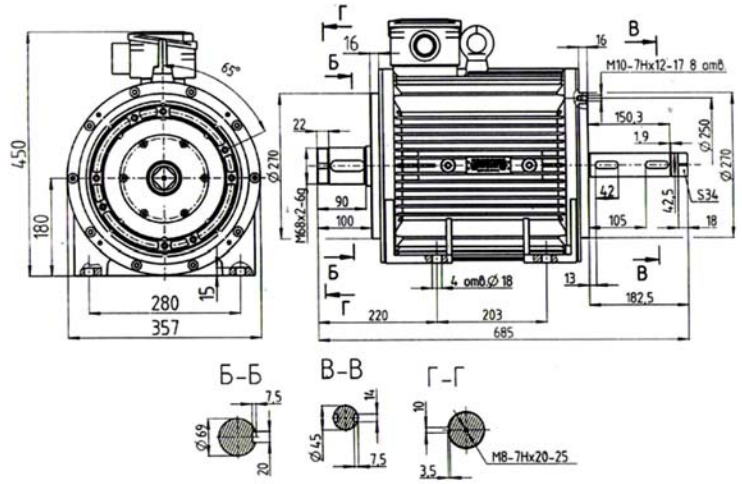
де v – швидкість; a – прискорення; r – радіус-вектор переміщення.

Плавність руху кабіни кількісно визначається значенням прискорення при розгоні. Максимальне прискорення кабіни при експлуатаційних режимах не повинне перевищувати – 2 м/с^2; для ліфтів у лікувально-профілактичних установах – 1 м/с^2. При зміні прискорення рухи збільшуються навантаження на конструктивні елементи ліфта та з'являються неприємні відчуття в пасажирів, тому що вестибулярний апарат людини чутливий до значення ривка. Максимальне значення ривка документально не обмежується, але зазвичай обмежується на рівні 3…10 м/с^3. Максимальна величина уповільнення кабіни під час зупинення кнопкою «Стоп» або спрацювання іншого вимикача безпеки – не більше ніж 3 м/с^2. Частота включень на годину для пасажирських ліфтів повинна становити 100–240, а для вантажних – 70–100 при тривалості включень 15–60%.

Зупинка кабіни повинна супроводжуватися накладенням механічного гальма. Відключення електродвигуна при зупинці кабіни повинно відбуватися після накладення гальма. Зняття механічного гальма повинне бути можливо тільки після створення (електричного моменту, достатнього для нормального розгону електродвигуна. В асинхронних редукторних електроприводах виконання цієї вимоги зазвичай забезпечується тим, що напруга живлення подається на електродвигун одночасно з подачею напруги на електромагніт гальма. В електроприводах постійного струму перед зняттям гальма на схему керування зазвичай подають сигнал задання моменту і струму двигуна, достатнього для втримання кабіни на рівні площадки без гальма (задання початкового струму).

Використання АД для побудови безредукторного електроприводу ліфта є нестандартним рішенням. Важливим завданням є експериментальна перевірка особливостей безредукторного частотно-керованого електроприводу з тихохідним асинхронним двигуном шляхом проведення його випробувань на діючих ліфтових установках (теплові випробування, вимірювання змінних електроприводу, точності зупинки, шумів і вібрацій, перевірка запасу механічних моментів).

Як було зазначено вище, в Україні широке застосування одержали безредукторні електроприводи, виконані на базі асинхронних низькооборотних (тихохідних) двигунів, прикладом яких є серія асинхронних ліфтових двигунів Харківського електротехнічного заводу: АДБ160L6/18ЛБУ3, АДБ180М6/18ЛБУ3 і АДБХ180L12ЛБУ3 (рис. 3, табл. 1–3). Двигуни АДБ призначені для редукторних приводів ліфтів, а АДБХ180 – для безредукторних приводів ліфтів, при роботі разом із частотним перетворювачем.



а)

б)

Рис. 3. Асинхронний двигун АДБХ180L12ЛБУ3 (а) та ліфтова безредукторна лебідка ЛЛБ-06 (б) створена на його базі

Таблиця 1

Двигуни серії АДБ

№ з/п	Серія, тип	Потужність, кВт	Напруга, В	Синхронна частота обертання, об/хв.	ККД, %
1	АДБ160L6/18ЛБУ3	3,55/1,18	380	1000/333	70/40
2	АДБ180М6/18ЛБУ3	4,2/1,25	380	1000/333	73/42

Таблиця 2

Двигуни серії АДБХ

Назва параметра	Значення параметра для режиму		
	Ревізії об'єкту	Мінімального	Номінального
Потужність, кВт	0,637	3,520	6,750
Частота обертання, об/хв.	56,000	134,000	203,000
Лінійна напруга, В	150,000	275,000	380,000
Частота живлення, Гц	6,000	15,000	24,000
Струм, *А*, не більше	23,500	17,000	21,000
Номінальний момент, *Н·м*, не менше	110,000	250,000	320,000
ККД, %, не менше	15,000	62,500	35,500
cosφ, град.	0,795	0,822	0,912

На базі двигуна АДБХ180L12ЛБУ3 створена ліфтова безредукторна лебідка ЛЛБ-06 для ліфтів вантажопідйомністю 400-630 кг зі швидкостями руху 1-1,6 м/с з поліспастним підвісом кабіни.

Таблиця 3

Технічні характеристики безредукторної ліфтової лебідки ЛЛБ-06

Технічні характеристики	Значення
Номінальна вантажопідйомність ліфта, *кг*	630
Допустиме навантаження на вісь, *кг*	1600
Поліспастний підвіс	2:1
Швидкість підйому кабіни ліфта, *м/с*	1,6
Маса кабіни, *кг*	700
Міжцентрова відстань між осями кабіни й противаги, *мм*	930
Кількість тягових канатів, *шт.*	4
Діаметр тягового каната, *мм*	8
Діаметр КВШ, *мм*	320
Діаметр вала двигуна під гальмо, *мм* Виліт вала двигуна, *мм*	45 200
Номінальна потужність двигуна, *кВт*	6,4
Номінальна частота обертання двигуна, *об/хв*.	191
Діапазон регулювання частоти обертання двигуна	40-250 *об/хв*. або 5-30 Гц
Номінальна напруга живлення двигуна, *В*	380
Номінальна частота живлення двигуна, *Гц*	24
Номінальний обертовий момент двигуна, *Н·м*	320
Тип гальма	дисковий
Номінальний статичний гальмівний момент, *Н·м*	470х2
Рід струму гальма	постійний
Напруга гальма, *В*	205
Корегований рівень звукової потужності, не більше	78
Максимальне число включень за годину (ДСТ 22011-95)	150
Розмір двигуна по лапам, *мм*	203×280
Маса двигуна (для чугунного виконання оболонки), *кг*	220

Канатоведучий шків (КВШ) установлюється безпосередньо на вал електродвигуна. Зі зворотної сторони двигуна на вал установлюються електромагнітні гальма і датчик швидкості. Охолодження електродвигуна – природна конвекція, без вентилятора на валу. В обмотку вбудований температурний захист; клас стійкості до нагріву ізоляції – Н (150 °*С*) з перевищенням температури обмоток до 110 °*С*. Режим роботи – повторно-короткочасний (S5 за ГОСТ 183) з розгоном і роботою при великій частоті обертання, наступним перемиканням і роботою з меншими частотами обертання і паузою.

Однак практика експлуатації такої лебідки показала, що дана конструкція має ряд недоліків, серед яких основними є важкість керування (підбір необхідних параметрів частотного перетворювача) і проблематичність точних зупинок. Перша проблема пов'язана зі "специфічними" параметрами самого двигуна: частота обертання, пускові струми, діапазон робочих напруг в різних режимах, тощо. Забезпечення оптимального поєднання цих параметрів практично неможливе на більшості ліфтових частотних перетворювачах. Налаштування потребує доступу до технологічних та часто закритих пунктів меню частотних перетворювачів, тісного контакту із заводами-виробниками перетворювальної техніки. Все це призводить до технічно та економічно важких рішень запуску та налаштування безредукторних лебідок на базі асинхронних тихохідних двигунів. Друга проблема більш критична, так як має комплексний характер і пов'язана із забезпеченням точних зупинок. Відсутність редуктора призводить до варіативних і важко

контрольованих "відкатів" двигуна як при старті так і при зупинці. Проблема також ускладнюється тісною залежністю від навантаження (дисбалансу) кабіни: чим більший дисбаланс тим менша точність попадання на зупинки – до 200 мм (що у десятеро більше допустимих норм).

Для розрахунку статичних і динамічних характеристик електроприводу з тихохідним асинхронним двигуном значний інтерес представляє розробка математичного опису і методики розрахунку параметрів схеми заміщення.

Для аналізу електромагнітних процесів в асинхронному двигуні зазвичай використаються диференціальні рівняння АД, записані у векторній формі в системі координат *u*, *v*, що обертається з довільною швидкістю $\omega_к$:

$$\left.\begin{aligned}
&\overline{U_1} = \frac{d\overline{\Psi_1}}{dt} + j\omega\overline{\Psi_1} + R_1\bar{i}_1;\\
&0 = \frac{d\overline{\Psi_2}}{dt} + j(\omega_k - \omega)\overline{\Psi_2} + R_2'\bar{i}_2;\\
&\overline{\Psi_1} = L_s\bar{i}_1 + M_0\bar{i}_2;\\
&M = \frac{3}{2}p_\tau\omega_м\frac{k_r}{\sigma X_s}I_m(\overline{\Psi_1}\overline{\Psi_2}^*);\\
&\frac{d\omega}{dt} = \frac{p_\tau}{J}(M - M_c),
\end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

де $\overline{U_1}$ – вектор напруги статора; $\overline{\Psi_1}$ і $\overline{\Psi_2}$ – вектори потокозчеплення статора і ротора; $\bar{i}_1$ і $\bar{i}_2$ – вектори струмів статора і ротора; p_τ – кількість пар полюсів АД; ω – електрична швидкість АД; $\omega_м = 2\pi f_м$ – кругова частота напруги живлення.

Векторні величини потокозчеплень і струмів статора і ротора пов'язані з відповідними скалярними наступними співвідношеннями:

$$\left.\begin{aligned}
&\overline{\Psi_1} = \overline{\Psi}_{U1} + j\overline{\Psi}_{\upsilon 1};\\
&\overline{\Psi_2} = \overline{\Psi}_{U2} + j\overline{\Psi}_{\upsilon 2};\\
&\bar{i}_1 = i_{U1} + ji_{\upsilon 1};\\
&\bar{i}_2 = i_{U2} + ji_{\upsilon 2}.
\end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

Система рівнянь (2) дозволяє розраховувати динамічні режими роботи при підстановці відповідних параметрів АД.

Активний опір статора двигуна:

$$R_{АД} = \rho_\vartheta\frac{L}{q_{еф}} \qquad (4)$$

де ρ_ϑ – питомий опір матеріалу обмотки статора при розрахунковій температурі; $q_{еф}$ – площа поперечного перерізу ефективного провідника статора; $L = l_{ср}\omega$ – довжина ефективних провідників фази обмотки статора, яка визначається середньою довжиною витка обмотки статора $l_{ср}$ і числом витків ω.

Індуктивний опір розсіювання обмотки статора:

$$X_C = 15{,}8\frac{f}{100}\left(\frac{\omega}{100}\right)^2\cdot\frac{l_\delta'}{pq}(\lambda_п + \lambda_л + \lambda_о) \qquad (5)$$

Коефіцієнти магнітної провідності пазового ($\lambda_п$), лобового ($\lambda_л$) і диференціального розсіювання ($\lambda_о$) статора визначаються геометричними розмірами магнітопроводу і технологією виготовлення обмотки статора.

Індуктивний опір розсіювання обмотки короткозамкненого ротора:

$$X_P = 7{,}9l_\delta'\cdot 10^{-6}(\lambda_п + \lambda_л + \lambda_о + \lambda_{ск}) \qquad (6)$$

де $\lambda_п$, $\lambda_л$, $\lambda_о$ – коефіцієнти пазового, лобового і диференціального розсіювання, $\lambda_{ск}$ – коефіцієнт магнітної провідності скосу, який враховує вплив скосу пазів на магнітну провідність.

Повний індуктивний опір фази статора:

$$X_s = X_0 + X_C \qquad (7)$$

де X_0 – опір взаємоіндукції обмоток статора і ротора; X_C – індуктивний опір розсіювання фази статора.

Тоді

$$L_s = 2m\frac{\mu_0}{p\pi^2}(\omega k_{об})^2\frac{l_\delta\tau}{\delta k_\delta}; \qquad X_s = L_s 2\pi f \qquad (8)$$

Номінальний струм асинхронного двигуна визначається відомою формулою:

$$I_{ном} = \frac{P_{ном}}{3U_{ф,ном}\eta_{ном}\cos\varphi_{ном}}, \quad (9)$$

де $P_{ном}$, $U_{ф,ном}$, $\eta_{ном}$ і $\cos\varphi_{ном}$ – номінальні значення потужності, фазної напруги, коефіцієнта корисної дії і коефіцієнта потужності.

При заданій потужності номінальний струм асинхронного двигуна тим менше, чим більше його номінальна напруга. При роботі зі зниженою частотою, збереженні магнітного потоку електричної машини і виконанні умови *M=const* асинхронному двигуну потрібна менша напруга, ніж при роботі з більш високими швидкостями. Отже, при роботі частотно-регульованого асинхронного електроприводу зі зниженими швидкостями між робочою напругою і доступним для використання мережним значенням є запас по напрузі. При збільшенні номінальної напруги АД на зниженій швидкості зростає необхідна напруга, при цьому запас по напрузі знижується. Вибираючи коефіцієнт зміни номінальної напруги відносно типового асинхронного двигуна для безредукторного електроприводу таким чином, щоб з однієї сторони зайвий запас по напрузі був мінімальний, а з іншої сторони обмежуючи напругу на рівні мережної, можливо найбільш ефективним чином мінімізувати необхідну для роботи електроприводу потужність перетворювача частоти. Даний принцип використовується для побудови низькошвидкісних асинхронних двигунів, призначених для застосування в безредукторному електроприводі. Низькошвидкісний асинхронний двигун відрізняється від типового значенням номінальної напруги.

В цьому ракурсі можлива побудова низькошвидкісного асинхронного двигуна, обмотки статора якого мають підвищене в порівнянні з типовим АД число витків. Застосування такого двигуна в частотно-регульованому електроприводі дозволяє вибирати перетворювач частоти на мінімальні струми а отже невеликої вартості.

Окрім розгляду електричних характеристик, слід співставити сумарні моменти інерції безредукторної тихохідної лебідки на базі асинхронного двигуна і редукторної двошвидкісної з асинхронним двигуном, як типового і масового представника застарілих редукторних приводів.

Типова конструкція ліфта з таким електроприводом схематично показана на рис. 5, а результати розрахунку приведеного до валу двигуна моменту інерції для редукторних лебідок виробництва «Могилёвлифтмаш» наведені в табл. 4.

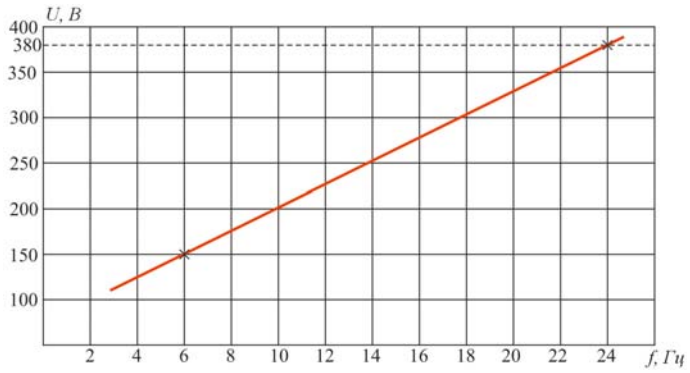


Рис. 4. Залежність робочої напруги від частоти ліфтової безредукторної лебідки на базі асинхронного тихохідного двигуна АДБХ180L12ЛБУ3 при законі керування *M=const*

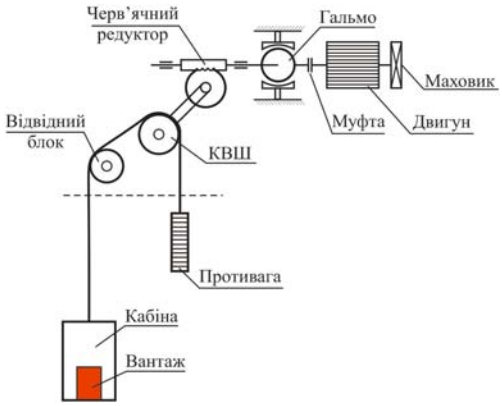


Рис. 5. Кінетична схема ліфта з редукторним електроприводом на базі двошвидкісного АД

Таблиця 4

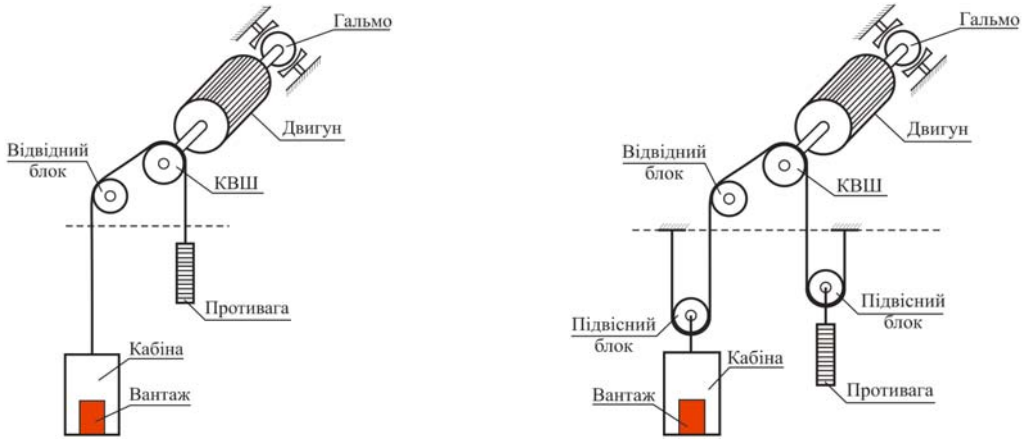
Приведені моменти інерції елементів редукторних лебідок «Могилёвлифтмаш»

Вантажопідйомність і номінальна швидкість ліфта	400 кг, 1 м/с		630 кг, 1 м/с	
	$кг \cdot м^2$	% від $J_{\Sigma 1}$	$кг \cdot м^2$	% від $J_{\Sigma 1}$
Маховик	0,59	56,2	1,112	55,6
Двигун	0,21	20	0,55	27,5
Муфта	0,067	6,4	0,067	3,4
Гальмовий механізм	0,039	3,7	0,039	1,9
КВШ	0,002	0,2	0,0037	0,2
Відвідної блок	0,0015	0,1	0,0024	0,1
Канати	0,003	0,3	0,006	0,3
Кабіна	0,06	5,7	0,089	4,5
Противага	0,077	7,3	0,118	5,9
$J_{\Sigma 1}$ (при порожній кабіні)	1,05		2,00	
$J_{\Sigma 2}$ (при номінальному завантаженні кабіни)	1,08		2,05	

J_{Σ} – сумарний приведений до вала двигуна момент інерції механізму

З табл. 4 видно, що при використанні редукторних лебідок із двошвидкісним АД частка обертових із двигуном мас (маховик, двигун, муфта) становить 82,6 % від приведеного сумарного моменту інерції. Рухомі поступально маси кабіни (з вантажем) і противаги становлять не більше 15 % від сумарного моменту інерції. Також слід зазначити, що при визначенні сумарного моменту інерції редукторного електроприводу можна зневажити впливом наступних елементів: КВШ, відвідним блоком, обертовими масами гальмівного механізму та масами канатів, які рухаються лінійно. Значення наведеного моменту інерції муфти для розглянутих лебідок відносно малі в порівнянні з моментом інерції двигуна, однак існують конструкції лебідок, у яких застосовуються масивні муфти.

Аналогічно розглянемо безредукторну лебідку ЛЛБ-06 з тихохідним асинхронним двигуном АДБХ180L12ЛБУ3.



а) **б)**

Рис. 6. Кінематичні схеми ліфтів з безредукторним електроприводом при прямому *(а)* і поліспастному *(б)* підвісах

Таблиця 5

Приведені моменти інерції елементів безредукторних лебідок ЛЛБ-06 на базі асинхронних двигунів серії АДБХ180L12ЛБУ3

Вантажопідйомність і номінальна швидкість ліфта	400 кг, 1 м/с		400 кг, 1 м/с		630 кг, 1 м/с	
Підвіс ліфта	прямий		поліспастний		поліспастний	
Одиниця вимірювання	$кг \cdot м^2$	% від $J_{\Sigma l}$	$кг \cdot м^2$	% від $J_{\Sigma l}$	$кг \cdot м^2$	% від $J_{\Sigma l}$
КВШ	0,256	0,6	0,256	2,0	0,256	1,5
Двигун	0,41	1,0	0,27	2,1	0,41	2,4
Гальмівний механізм	0,653	1,5	0,653	5,0	0,653	3,8
Відвідний блок	0,256	0,6	0,256	2,0	0,256	1,5
Канати	0,488	1Д	0,977	7,5	1,3	7,6
Кабіна	17,92	41,7	4,8	36,9	6,08	35,6
Противага	23,04	53,6	5,76	44,3	8,09	47,4
$J_{\Sigma l}$ (при порожній кабіні)	43,02		13,00		17,05	
$J_{\Sigma l}$ (при номінальному завантаженні кабіни)	53,26		15,56		21,05	

З аналізу табл. 5 слідує, що такі елементи конструкції, як КВШ, гальмівний механізм, відвідної блок при безредукторному виконанні електроприводу вносять у сумарний момент інерції співрозмірний із двигуном внесок. У випадку редукторного електроприводу впливом даних елементів можна було зневажити.

Таким чином, для редукторних лебідок відношення сумарного моменту інерції електроприводу до моменту інерції двигуна становить (2,5-6):1. При використанні безредукторних лебідок дане співвідношення становить (40-60):1 при поліспастному і (100-128):1 при прямому підвісі. Безредукторний електропривод у порівнянні з редукторним має значно більший сумарний момент інерції. При використанні безредукторної лебідки значення сумарного моменту інерції при нульовому і номінальному завантаженню кабіни різняться на 20-25 %. При використанні редукторного електроприводу – не більше ніж на 3-5 % і практично не залежить від завантаження кабіни. При використанні безредукторного електроприводу значно знижується необхідна для розгону двигуна і обертових мас лебідки енергія.

Динамічні режими роботи електроприводу енергетично більш витратні відносно статичних. Для оцінки зниження витрат енергії в динамічних режимах при використанні безредукторного електроприводу становить інтерес розрахувати значення сумарної кінетичної енергії ліфтів вантажопідйомністю 400 кг і 630 кг при номінальній швидкості руху 1 м/с:

$$W = \frac{J_{\Sigma} \cdot \omega^2}{2}, \quad (10)$$

де J_{Σ} – сумарний приведений до вала двигуна момент інерції механізму; ω –швидкість двигуна.

У розглянутих редукторних лебідках частота обертання двошвидкісного асинхронного двигуна близько 1000 об/хв., тобто ω=1000/9,55=104,7 рад/с. У безредукторній лебідці ЛЛБ-06 частота обертання двигуна АДБХ180L12ЛБУ3 (згідно табл. 3) складає 200 об/хв., тобто ω=200/9,55=20,9 рад/с. У табл. 6 наведені результати, розрахунку при використанні редукторного та безредукторного електроприводів.

Таблиця 6

Кінетична енергія ліфтів із редукторними та безредукторними лебідками

Тип, вантажопідйомність і номінальна швидкість ліфта	Редукторна лебідка «Могилевлифтмаш»		Безредукторна лебідка ЛЛБ-06 на базі двигуна АДБХ180L12ЛБУ3		
	400 кг, 1 м/с	630 кг, 1 м/с	400 кг, 1 м/с прямий	400 кг, 1 м/с поліспастний	630 кг, 1 м/с поліспастний
Енергія, *Дж* (порожня кабіна)	5184	9864	864	1044	1332
Енергія, *Дж* (номінальне завантаження)	5328	10152	1044	1224	1656

З табл. 6 видно, що сумарна кінетична енергія ліфта з безредукторним електроприводом при номінальній швидкості в 5-6 разів менше, ніж при використанні редукторного електропривода.

Отримані результати досліджень та розрахунки були підтверджені практично і лягли в основу вирішення проблемних питань безредукторних тихохідних лебідок. Так, випробування лебідки ЛЛБ-06 на базі асинхронного двигуна АДБХ180L12ЛБУ3 без зворотного зв'язку (open loop) показали незадовільні результати і довели, що прийнятна робота в якості ліфтової лебідки в такому режимі неприпустима. Спостерігалися критичні неточності зупинки ліфта на поверсі (до 200 мм) і сильна залежність від завантаження кабіни, яка потребувала постійного підлаштування системи. Разом із тим, система "open loop" добре зарекомендувала себе з редукторними лебідками завдяки черв'ячній передачі та великій інерційності системи двигун-редуктор.

Для забезпечення комфортного, надійного пересування ліфта та задоволення вимог правил безпечної експлуатації ліфтів [1–3] рекомендується наступна схема ввімкнення (рис. 7, *б*) безредукторного тихохідного двигуна. Це схема із закритим контуром (closed loop), тобто містить коло зворотного зв'язку на основі сигналів енкодера. Для спрощення і здешевлення обладнання енкодер може бути інкрементним, але бажано з великою розрізнювальною здатністю – 2500…5000 імпульсів на один оберт. Зрозуміло, що абсолютний енкодер дасть кращі результати, але він має на порядки більшу вартість.

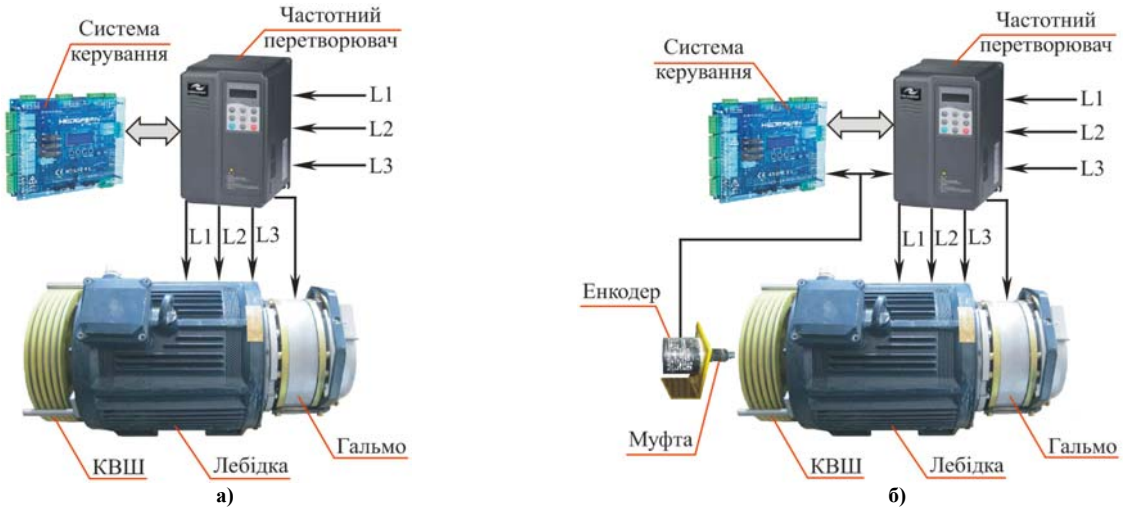


Рис. 7. Схема під'єднання лебідки ЛЛБ-06 на базі асинхронного двигуна АДБХ180L12ЛБУ3: а) без зворотного зв'язку (open loop); зі зворотним зв'язком (closed loop)

Стосовно труднощів керування та підбору необхідних параметрів частотного перетворювача – проблема вирішується вибором ліфтового частотного перетворювача, наприклад добре зарекомендували себе Omron LX, Yaskawa та Inovance.

Висновки

Виконання безредукторного електропривода з типовими асинхронними двигунами недоцільно, тому що при цьому потрібен перетворювач частоти із потужністю, приблизно рівною номінальній потужності

двигуна. Ефективніше використовувати низькошвидкісні АД, які конструктивно відрізняється від типового тільки обмоткою статора. Використання тихохідного асинхронного двигуна в безредукторному електроприводі дозволяє мінімізувати необхідну потужність перетворювача частоти, що покращує техніко-економічні показники електроприводу. Безредукторний електропривод у порівнянні з редукторним має значно більший сумарний момент інерції. Встановлено, що при використанні безредукторного електропривода з тихохідним асинхронним двигуном кінетична енергія ліфта при номінальній швидкості менше (до 5-6 разів) ніж у випадку використання редукторного електроприводу із двошвидкісним АД. Проведені випробування та налаштування на діючих ліфтових установках тихохідної безредукторної лебідки ЛЛБ-06 на базі асинхронного двигуна АДБХ180L12ЛБУ3. Надано рекомендації по усуненню основних недоліків даного типу лебідок. За рахунок вибору частотного перетворювача та введення сигналів зворотного зв'язку вдалося досягнути підвищеної комфортності пересування ліфтів за рахунок високої плавності ходу і забезпечення точності зупинок.

Література

1. НПАОП 0.00-1.02-08. Правила будови і безпечної експлуатації ліфтів.

2. ДСТУ ISO 18738:2004. Ліфти (елеватори). Вимірювання параметрів якості руху ліфта.

3. ДСТУ EN 81-1:2003. Норми безпеки до конструкції та експлуатації ліфтів. Частина 1. Ліфти електричні.

4. Галкин А. А. Особенности механических параметров безредукторных лебедок лифта с низкоскоростным асинхронным двигателем / А. А. Галкин // Электропривод и системы управления: Труды МЭИ. – М. : Издательский дом МЭИ, 2009. – Вып. 685. – С. 67–72.

References

1. NPAOP 0.00-1.02-08. Pravyla budovy i bezpechnoyi ekspluatatsiyi liftiv.

2. DSTU ISO 18738:2004. Lifty (elevatory). Vymiryuvannya parametriv yakosti rukhu lifta.

3. DSTU EN 81-1:2003. Normy bezpeky do konstruktsiyi ta ekspluatatsiyi liftiv. Chastyna 1. Lifty elektrychni.

4. Halkyn A. A. Osobennosty mekhanycheskykh parametrov bezreduktornih lebedok lyfta s nyzkoskorostnim asynkhronnim dvyhatelem // Elektropryvod y systemi upravlenya: Trudi MEY: Vip. 685. – M.: Izdatelskiy dom MEY, 2009. – S. 67–72.

Рецензія/Peer review : 23.11.2017 р. Надрукована/Printed :04.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Бойко Ю.М.

УДК 621.3.052.63

А.І. СЕМЕНКО
Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», м. Київ
Н.І. БОКЛА
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів
К.О. ДОМРАЧЕВА, Є.О. ШЕСТОПАЛ
Державний університет телекомунікацій, м. Київ

ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНА СИСТЕМА З ПОКРАЩЕНИМ ПРИЙМАННЯМ АМПЛІТУДНО-МАНІПУЛЬОВАНОГО СИГНАЛУ

У статті розглядається телекомунікаційна система з амплітудно-маніпульованим сигналом. Пропонується створити в складі сигналу синхронізації, який формується в передавачі, тестовий імпульс з максимальною амплітудою. В приймачі з використанням тестового імпульсу здійснюється автоматичне встановлення максимального значення вхідного сигналу на вході вирішуючого пристрою, що забезпечує покращене приймання всіх рівнів амплітудно-маніпульованого сигналу.

Ключові слова: телекомунікаційна система, амплітудно-маніпульований сигнал, передача даних.

A. SEMENKO
Open University of Human Development “Ukraine”. Institute of Computer Technologies
N. BOKLA
National University of Lviv Polytechnic
K. DOMRACHEVA, I. SHESTOPAL
State University of Telecommunications

TELECOMMUNICATION SYSTEM WITH IMPROVED RECEPTION OF AM SIGNAL

A telecommunication system with AM signal is considered in this article, which, for example, is used to create the equipment for colour television technology VSB (Vestigial sideband). In this system, the signal is taken from different levels of the maximum amplitude and other values in accordance with the signal amplitude depending on the radio channel conditions. To ensure signal processing at maximum signal levels it is proposed to create as part of a clock signal, which is formed in the transmitter, test pulse with the maximum amplitude. In receiver using test pulse automatic maximum input signal is performed at the input of solving device that provides improved reception of all levels of amplitude-manipulated signal. Automatic control system is stable as a system of second order and at large factor in the transmission system disconnected state -not least 100 provide high-level control signal with the exact error up to 1%. Summing up the whole research, it is worth noting the following research results: 1. Thanks to the automatic control of the strengthening factor of the *amplifier during the test pulse, a clear reception of the maximum values of the amplitude-manipulated signal was achieved. 2. The proposed method for improving the reception of amplitude-manipulated signal can be used during the construction of digital television systems using signals 2-VSB, 4-VSB, 8-VSB, 16-VSB and other telecommunication systems. The article deals with the telecommunication system with amplitude-manipulated signal, which, for example, is used for the creation of color TV equipment using VSB (Vestigial Side-Band) technology. In such a system, a signal with different levels of maximum amplitude and correspondingly other signal amplitude values depending on the state of the radio channel was received. In order to provide signal processing at maximum signal levels, it is proposed to create a test pulse with a maximum amplitude in the composition of the synchronization signal, which is formed in the transmitter.*

Keywords: telecommunication system, amplitude-manipulated signal, data transmission.

Вступ. Однією із найважливіших характеристик телекомунікаційної системи (ТКС) вважається швидкість передачі інформації – пропускна здатність системи, яка визначається смугою пропускання радіоканалу Δf та кількістю позицій сигналу M [1, 2]:

$$C = \Delta f \log M \ . \qquad (1)$$

При даній смузі пропускання радіоканалу, яка обмежується вимогами дефіциту частотного ресурсу, досягти бажаного результату з підвищеною пропускною здатністю системи можна шляхом збільшення кількості позицій амплітудно-маніпульованого сигналу (рис. 1). Такий метод, наприклад, використовується при побудові систем цифрового телебачення з багатопозиційною амплітудною маніпуляцією за технологією VSB (Vestigal Side-Band) (рис. 2), яка дозволяє підвищити швидкість передачі інформації без збільшення смуги пропускання радіоканалу [3].

При збільшенні кількості позицій може бути відчутним вплив завад, які завжди мають місце в радіоканалі. Тому важливо здійснити приймання сигналу при максимальному значенні рівнів багатопозиційного сигналу.

У статті розглядається телекомунікаційна система з амплітудно-маніпульованим сигналом, яка, наприклад, використовується при створенні обладнання кольорового телебачення за технологією VSB (Vestigal Side-Band). В такій системі приймається сигнал з різними рівнями максимальної амплітуди і відповідно інших значень амплітуди сигналу в залежності від стану радіоканалу. З метою забезпечення обробки сигналу при максимальних рівнях сигналу пропонується створити в складі сигналу синхронізації, який формується в передавачі, тестовий імпульс з максимальною амплітудою. В приймачі з використанням тестового імпульсу здійснюється автоматичне встановлення максимального значення вхідного сигналу на вході вирішуючого пристрою, що забезпечує покращене приймання всіх рівнів амплітудно-маніпульованого сигналу. Система автоматичного регулювання є стійкою як система другого порядку і при великому значенні коефіцієнта передачі системи в розімкненому стані – не менше 100 забезпечення високоточного

регулювання рівня сигналу з точною помилкою до 1%.

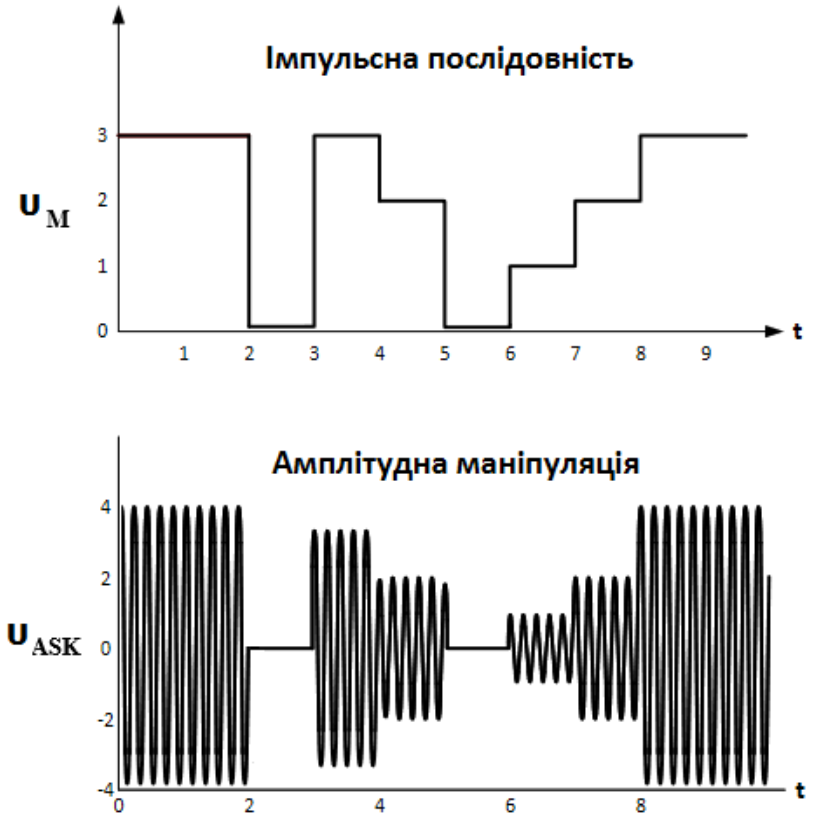


Рис. 1. Амплітудно-маніпульований сигнал: U_M – модулюючий відеосигнал; U_{ASK} – амплітудно-маніпульований радіосигнал

Запропонований метод покращення приймання може бути використаний при побудові систем цифрового телебачення з використанням сигналів 2-VSB, 4-VSB, 8-VSB, 16-VSB .

Метод покращення приймання амплітудно-маніпульованого сигналу. В роботі пропонується метод досягнення на вході вирішуючого пристрою приймача максимально можливого значення рівнів амплітудно-маніпульованого сигналу .

На рис. 2 наведена схема ТКС. В передавачі 1 формується сигнал, який передається до приймача 2 через канал 6. В пристрої формування сигналу 3 створюється сигнал з тривалістю циклу $T_ц$, до складу якого входить сигнал синхронізації тривалістю T_c та корисний інформаційний сигнал тривалістю T_i (рис. 3). До складу сигналу синхронізації включається тестовий сигнал тривалістю T з максимальною амплітудою A.

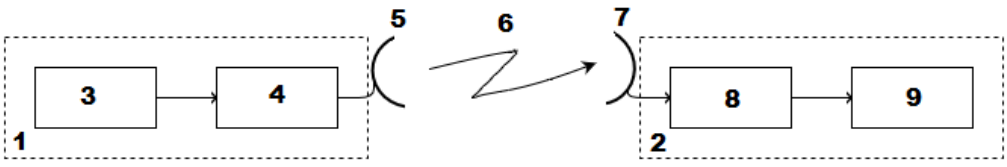


Рис. 2. Структурна схема ТКС: 1 – передавач; 2 – приймач; 3 – пристрій формування сигналу; 4 – підсилювач; потужності; 5, 7 – антени передавача та приймача, відповідно; 6 – радіоканал; 8 – пристрій обробки сигналу; 9 – демодулятор

В пристрої обробки сигналу приймача (рис. 4) з використанням сигналу помилки, що одержується в елементі порівняння 1, здійснюється автоматичне встановлення максимального рівня сигналу на вході вирішуючого пристрою 6, що відповідає максимальному значенню вхідної напруги. Для цього створюється замкнута система автоматичного регулювання коефіцієнта підсилення підсилювача 2, до складу якої також входять ланцюг зворотного зв'язку 3 та пристрій пам'яті сигналу керування 4. Система автоматичного регулювання буде структурно стійкою, як система другого порядку[4–6].

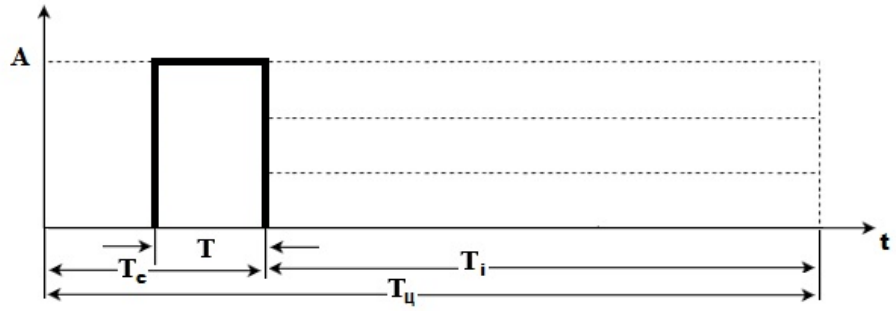


Рис. 3. Структура сформованого сигналу

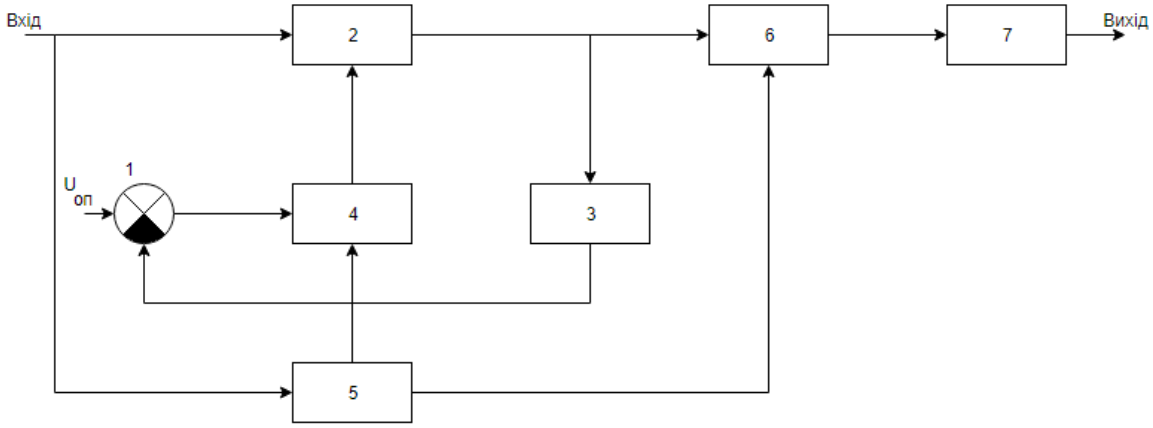


Рис. 4. Структурна схема пристрою обробки сигналу: 1 – елемент порівняння; 2 – підсилювач; 3 – ланцюг зворотного зв'язку; 4 – елемент пам'яті; 5 – пристрій синхронізації; 6 – вирішуючий пристрій; 7 – демодулятор

На рис. 5 наведена структурна схема системи автоматичного регулювання, до якої входять два аперіодичних ланцюга: ланцюг керування коефіцієнтом підсилення підсилювача з постійною часу T_1 та ланцюг зворотного зв'язку з постійною часу T_2.

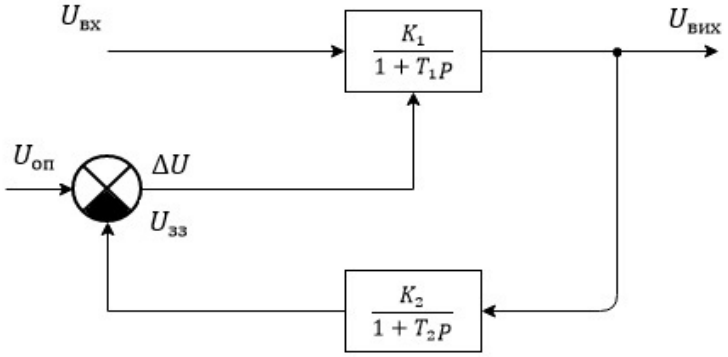


Рис. 5. Структурна схема системи автоматичного регулювання коефіцієнта підсилення підсилювача

Передавальна функція розімкненої системи автоматичної системи регулювання в операторній формі буде [3]

$$K_p(p) = \frac{K}{(1+T_1 p)(1+T_2 p)}, \tag{2}$$

де p – комплексна змінна, K – коефіцієнт передачі ланцюгів в статичному режимі.

$$K = K_1 K_2. \tag{3}$$

Остаточна помилка в системі, як в автоматичній системі, відповідно до передавальної функції за помилкою буде

$$\frac{\Delta U}{\Delta U_{поч}} = \frac{1}{1+K}, \tag{4}$$

де $\Delta U_{поч}$ – початкова помилка в розімкненій системі.

Важливо, щоб коефіцієнт передачі розімкненої системи регулювання був не менший 100, що забезпечить помилку регулювання на рівні 1%. Для забезпечення потрібної швидкодії системи з огляду на здійснення регулювання сигналу протягом тривалості тестового імпульсу смуга пропускання розімкненої системи має бути не меншою $\Delta f_p = \frac{5}{T}$.

За час дії тестового імпульсу до закінчення тривалості циклу в системі буде здійснюватися чітке приймання всіх рівнів амплітудно-маніпульованого сигналу завдяки збереженню в пристрої пам'яті 4 величини сигналу керування на цей період та подачі до вирішуючого пристрою тактових сигналів від пристрою синхронізації 5. Після закінчення першого циклу почнеться процес синхронізації на другому і подальших інтервалах циклів з корекцією рівня керуючого сигналу в пристрої пам'яті.

Висновки

Отже, підсумовуючи вище викладене, варто відмітити наступні результати досліджень:

1. Завдяки автоматичному регулюванню коефіцієнта підсилення підсилювача на протязі одержаного тестового імпульсу досягається чітке приймання максимальних значень амплітудно-маніпульованого сигналу.

2. Запропонований метод покращення приймання амплітудно-маніпульованого сигналу може бути використаний під час побудови систем цифрового телебачення з використанням сигналів 2-VSB, 4-VSB, 8-VSB, 16-VSB та в інших ТКС.

Література

1. Мамчев Г.В. Основы радиосвязи и телевидения / Г.В. Мамчев. – М. : Горячая линия-Телеком, 2007. – 416 с.

2. Шинкарук О.М. Приймання та оброблення сигналів : навч. пос. / О.М. Шинкарук, В.І. Правда, Ю.М. Бойко. – Хмельницький : ХНУ, 2013. – 365 с. – ISBN 978-966-330-192-1.

3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр ; пер. с англ. – Изд. 2-е, испр. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2004. – 1104 с.

4. Теорія автоматичного управління / Г.Ф. Зайцев, В.К. Стеклов, О.І. Бріцький / за ред. Г.Ф. Зайцева. – К. : Техніка, 2002. – 688 с.

5. Бойко Ю. М. Проблеми синтезу пристроїв тактової синхронізації приймачів супутникових телекомунікаційних систем передачі інформації / Ю. М. Бойко, О. І. Єрьоменко // Вісник НТУУ КПІ. Телекомунікації, радіолокація і навігація, електроакустика. – К., 2014. – № 58. – С. 55–66.

6. Бойко Ю. М. Синтез і аналіз інформаційно-управляючих систем синхронізації засобів телекомунікацій / Ю. М. Бойко // Адаптивні системи автоматичного управління : міжвідом. науч.-техн. зб. / Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського". – Київ, 2017. – Вип. 1'(30). – С. 8–28.

References

1. Mamchev H.V. Osnovy radiosviazi y televidenia / H.V. Mamchev. – M. : Horiachaia lynyia-Telekom, 2007. – 416 s.

2. Shynkaruk O.M. Pryimannia ta obroblennia syhnaliv : navch. pos. / O.M. Shynkaruk, V.I. Pravda, Yu.M. Boiko. – Khmelnytskyi : KhNU, 2013. – 365 s. – ISBN 978-966-330-192-1.

3. Skliar B. Tsyfrovaia sviaz. Teoretycheskye osnovы y praktycheskoe prymenenye / B. Skliar ; per. s anhl. – Yzd. 2-e, yspr. – M.: Yzdatelskyi dom «Vyliams», 2004. – 1104 s.

4. Teoriia avtomatychnoho upravlinnia / H.F. Zaitsev, V.K. Steklov, O.I. Britskyi / za red. H.F.Zaitseva. – K. : Tekhnika, 2002. – 688 s.

5. Boiko Yu. M. Problemy syntezu prystroiv taktovoi synkhronizatsii pryimachiv suputnykovykh telekomunikatsiinykh system peredachi informatsii / Yu. M. Boiko, O. I. Yeromenko // Visnyk NTUU KPI. Telekomunikatsii, radiolokatsiia i navihatsiia, elektroakustyka. – K., 2014. – 58. – S. 55–66.

6. Boiko Yu. M. Syntez i analiz informatsiino-upravliaiuchykh system synkhronizatsii zasobiv telekomunikatsii / Yu. M. Boiko // Adaptyvni systemy avtomatychnoho upravlinnia : mizhvidom. nauch.-tekhn. zb. / Nats. tekhn. un-t Ukrainy "Kyiv. politekhn. in-t im. Ihoria Sikorskoho". – Kyiv, 2017. – Vyp. 1(30). – S. 8–28.

Рецензія/Peer review : 15.11.2017 р. Надрукована/Printed :19.11.2017 р.
Рецензент: д.т.н. Бойко Ю.М.

УДК 621.3

І.В. ГУЛА, В.В. МІШАН, С.О. КОВАЛИШИН, Я.В. КІЛІХЕВИЧ
Хмельницький національний університет

АНАЛІЗ СУЧАСНОЇ ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ ТА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ СИСТЕМ БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ MIMO

Розглянуто принципи реалізації технології MIMO. Розглянуто сучасну елементну базу та технічні рішення, які використовують під час побудови систем MIMO в мережах стандартів 802.11, 802.16. Реалізація технології MIMO можлива в системах радіорелейного, тропосферного та короткохвильового зв'язку, в системах: LTE Advanced, UMTS, WiMax IEEE 802.16e і IEEE 802.16m, сучасних і перспективних системах зв'язку Wi-Fi 802.11n і IEEE 802.11ac. Застосування запропонованої елементної бази дає можливість зменшити енергоспоживання систем передачі даних, знизити їх вартість, збільшити робочу дальність та пропускну спроможність.

Ключові слова: MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output), антена, радіорелейний зв'язок, короткохвильовий зв'язок.

I.V. GULA, V.V. MISHAN, S.O. KOVALYSHYN, Y.V. KILIKHEVYCH
Khmelnytsky National University

ANALYSIS OF THE MODERN ELEMENT BASE AND TECHNICAL SOLUTIONS OF MIMO NETWORKING SYSTEMS

The principles of implementation of MIMO technology are considered. The modern element base and technical solutions that are used in the construction of MIMO systems in the networks of standards 802.11, 802.16 are considered. The analysis of typical chips used in the construction of MIMO equipment is carried out. It is shown that MIMO systems use chips that are united into one chipset. In MIMO systems, IceFyre Semiconductor chipsets are typically based on two chipsets: one - SureFyre 802.11a standard and the other - TwinFyre to support all three versions of standard a, b and g. Also, the AR5004X and AR5006X chipsets are widely used on Atheros Communications chipsets. Implementation of MIMO technology is possible in the systems of radio relay, tropospheric and short-wave communication, in systems: LTE Advanced, UMTS, WiMax IEEE 802.16e and IEEE 802.16m, modern and advanced Wi-Fi 802.11n and IEEE 802.11ac communication systems. One of the main promising areas of work of modern manufacturers of chipsets for networks 802.11, 802.16 standards - increase the working range of the MIMO equipment.

The application of the proposed element base enables to reduce the power consumption of data transmission systems, reduce their cost, increase working range and throughput in MIMO systems.

Keywords: MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output), antenna, radio-relay communication, short-wave communication.

Вступ

Системи зв'язку, які використовують для прийому та передачі дві або чотири антени (два, чотири приймально-передавальних тракти) в одному пристрої зв'язку (системи MIMO) відіграють важливу роль у сучасних цифрових комунікаціях. Це забезпечується багатьма значними перевагами перед пристроями зв'язку, які працюють на одній антені або з одним каналом обробки вхідних або вихідних даних: підвищується швидкість передачі інформації в системі, підвищується стійкість системи, зменшується необхідна потужність передавача. Однак системи MIMO не відіграють домінантної ролі у короткохвильових системах зв'язку, радіорелейних системах зв'язку, надширокосмугових системах зв'язку із стрибкоподібною зміною носійної частоти, в радіолокаційних системах, через апаратні та програмні обмеження, які полягають в складності роботи елементів системи, а особливо швидкодії алгоритмів обробки інформації. Хоча застосування GaAs технології дозволяє використати технології MIMO у таких системах, але вартість апаратури значно зростає. Одночасно зі зростанням кількості елементів апаратури MIMO зростає собівартість таких систем. Необхідно шукати нові методи оптимізації структури елементної бази, які вирішили б питання складності апаратури, підвищення енергоефективності та зниження її собівартості.

Аналіз досліджень та публікацій

Найпоширенішими технічними реалізаціями систем зв'язку є наступні системи: першою традиційною системою зв'язку є система з однієї передавальною і однієї приймальною антеною. Така система в сучасній літературі отримала назву SISO(Single-Input-Single-Output); також широко відомі системи зв'язку з однією передавальною антеною і декількома приймальними антенами SIMO (Single Input-Multiple-Output). У цих системах кілька приймальних антен застосовується для реалізації відомого алгоритму рознесеного прийому сигналів в каналах зв'язку з завмираннями; існують системи зв'язку з декількома передавальними антенами при одній приймальній антені, такі системи отримали назву систем MISO (Multiple Input-Single-Output). У цих системах також, як і в системах SIMO, реалізується ідея рознесення, але рознесення застосовується на передавальній стороні. Таким чином в системах MISO реалізується алгоритм рознесеної передачі [1, 3, 4].

Сучасним перспективним узагальненням систем SIMO і MISO є системи зв'язку, в яких використовується кілька передавальних антен і кілька приймальних антен. Такі системи відомі під назвою MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output). У системах MIMO може бути реалізовано, як просторове рознесення на прийом, так і просторове рознесення на передачу. Крім того, існують системи MIMO – багато користувачів (MU-MIMO - Multiuser MIMO), в яких базова станція з кількома приймально-передавальними антенами взаємодіє з декількома абонентськими станціями, кожна з яких може мати одну або кілька

приймально-передавальних антен [2]. На рис. 1 схематично показані можливі конфігурації багатоантенних систем. У системах MIMO, очевидно, і на передавальній стороні, і на приймальній стороні використовуються багатоелементні антени або антенні решітки. Багатоелементні антени можуть використовуватись таким чином, щоб зосередити енергію в сторону певного абонента і сформувати відповідну діаграму спрямованості (адаптивне формування променю діаграми спрямованості – beamforming)[1, 3, 4].

Крім того, багатоелементні антени можуть бути використані для формування декількох паралельних потоків даних (режим просторового мультиплексування – spatial multiplexing)[5].

Спільне використання ефектів просторового рознесення, просторового мультиплексування і формування променя діаграми спрямованості дозволяє [3] підвищити стійкість системи (зменшити ймовірність помилки); підвищити швидкість передачі інформації в системі; збільшити зону покриття; зменшити необхідну потужність передавача.

Ці чотири позитивних властивості систем MIMO, не можуть бути реалізовані одночасно.

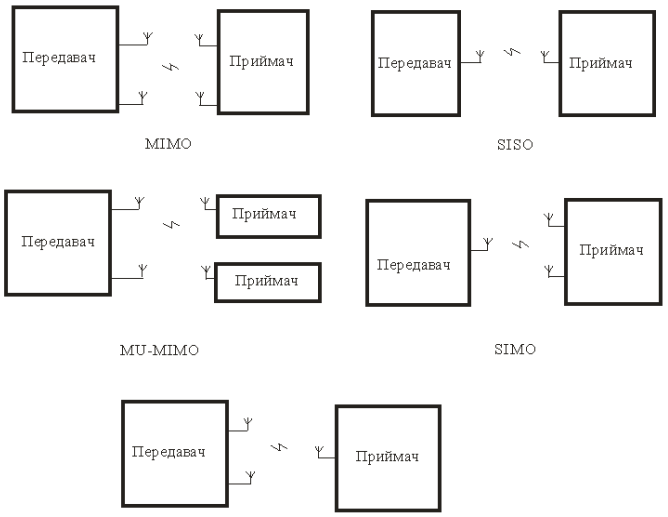


Рис. 1. Різні конфігурації антенних систем

Наприклад, збільшення швидкості передачі інформації призводить до збільшення ймовірності помилки або до збільшення потужності передавача, яка випромінюється. Тому при розробці конкурентних систем зв'язку необхідно знаходити компроміс. Оскільки в системах MIMO використовується декілька антен як на приймальній, так і на передавальній стороні для того, щоб використати ці переваги повною мірою, потрібно конструктивна оптимізація елементної бази, яка буде використовуватись в таких системах, щоб підвищити енергоефективність систем MIMO та збільшити їх надійність.

Постановка завдання

Порівняємо деякі з можливих варіантів застосування в якості елементної бази для систем MIMO. В системах MIMO використовуються мікросхеми, які об'єднанні в один чіпсет, що дає змогу зменшити енергоспоживання таких систем. Один з основних напрямків робіт сучасних виробників чіпсетів для мереж 802.11 стандарту – збільшення дальності дії. Цей параметр для більшості стандартних Wi-Fi-модемів не перевищує 100 м в приміщенні і 300 м у відкритому просторі в зоні прямої видимості. Зокрема, чіпсет 802.11a/b/g стандарту четвертого покоління компанії Atheros Communications серії AR5004X (рис. 6), що містить дві мікросхеми і виконаний за технологією розширеної дальності (extended Range – XR), забезпечує вдвічі більшу дальність дії – до 790 м. Чіпсет забезпечує можливість під'єднання приладу до локальної мережі будь-якого діючого сьогодні 802.11 стандарту. У чіпсет входять дві мікросхеми, виконані за КМОП-технологію (рис. 2) [1, 2, 5, 6]:

Перша мікросхема – дводіапазонна "радіостанція на кристалі" (РНК) типу AP5112, розрахована на діапазони частот 2,3-2,5 і 4,9-5,85 ГГц і містить підсилювач потужності і малошумлячий підсилювач. Для спеціальних пристроїв передбачена можливість застосування зовнішніх підсилювачів (потужності і малошумлячого). Мікросхема дозволяє обійтися без фільтрів ПЧ і без більшості ВЧ-фільтрів, а також зовнішніх ГКН і ПАР-фільтрів. Напруга живлення мікросхеми 2,5–3,3 В.

Друга мікросхема – мультипротокольний MAC/baseband-процесор типу AR5213, що підтримує РНК. Мікросхема містить блоки стиснення даних в реальному часі, швидкої покадрової і пакетної передачі, ЦАП і АЦП. Напруга живлення 1,8-3,3В. Збільшення дальності передачі досягнуто за рахунок вдосконалення мікросхеми MAC/baseband-процесора, а не ВЧ-мікросхеми. Технологія (XR), яка використовується в мікросхемі, дозволяє супроводжувати, калібрувати і інтерпретувати сигнали чотирьох OFDM-каналів.

Завдяки зміні швидкості передачі даних на великих відстанях вирішена проблема зниження відношення пікової потужності до середньої потужності та покращена ефективність кодування.

Також широко використовується мікросхема компанії Atheros – AR5006X – на основі однокристальної КМОП- мікросхеми AR5413 (рис. 3), що реалізує підключення до локальних мереж стандартів 802.11 d/b/g.

Мікросхема містить MAC, baseband-процесор і дводіапазонний ВЧ-блок з поліпшеними характеристиками. Завдяки можливості підключення до будь-яких Wi-Fi-мереж, підтримці стандарту 802.11, а також підтримці режимів XR і Super AG, AP5006X широко використовується для виробництва електронного обладнання. Мікросхема AP5006X не тільки дозволяє виключити одну мікросхему, що входила в попередній чіпсет, але і скоротити число використовуваних дискретних компонентів.

В результаті вдалося на 15% зменшити число компонентів, що застосовуються в розроблюваних

пристроях, і істотно знизити витрати у виробництві. У однокристальній схемі підтримки стандартів 802.11a/b/g типу AP5413 використаний вдосконалений широкосмуговий приймач, в який входить контролер послідовності каналів з найкращими умовами передачі, що забезпечує велику дальність передачі і більш високу стійкість до багатопроменевого розповсюдження [2, 5, 6].

Як і в попередній мікросхемі РНК, для спеціальних додатків передбачена можливість застосування зовнішніх підсилювача потужності і малошумлячого підсилювача, а також виключені всі фільтри ПЧ і більшість ВЧ-фільтрів, а також зовнішні ГКН і ПАР-фільтри. В цілому за своїми параметрами однокристальна мікросхема схожа з попереднім чіпсетом. Напруга живлення становить 1,8-3,3 В.

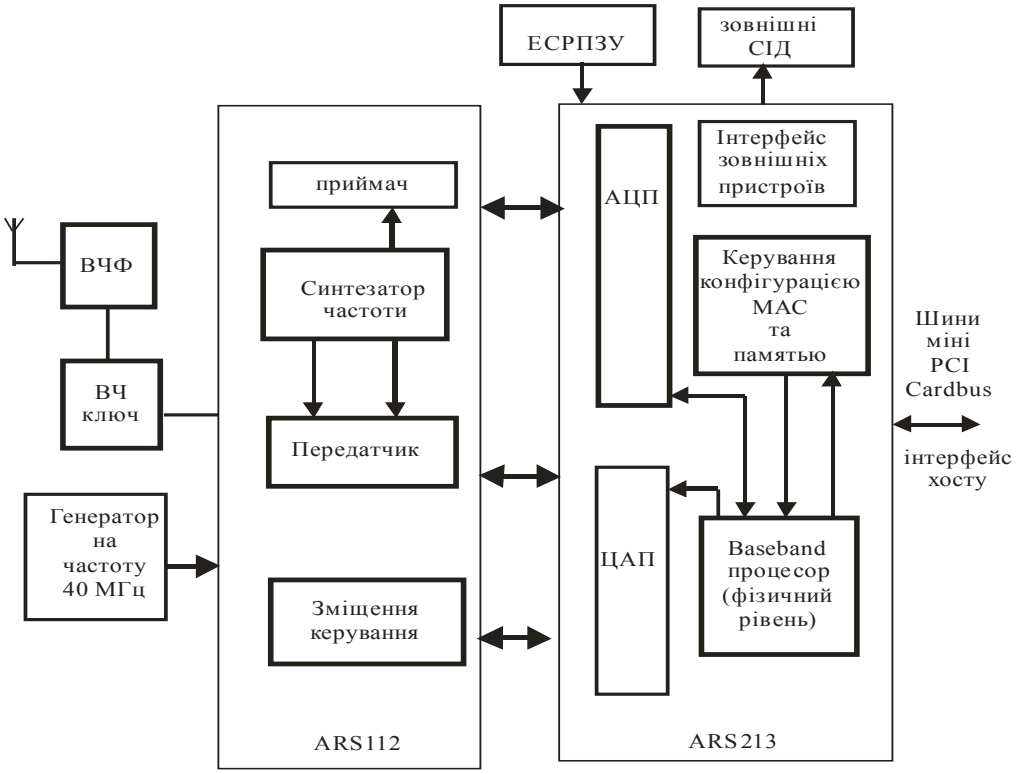


Рис. 2. Архітектура WLAN-модуля AR5004X

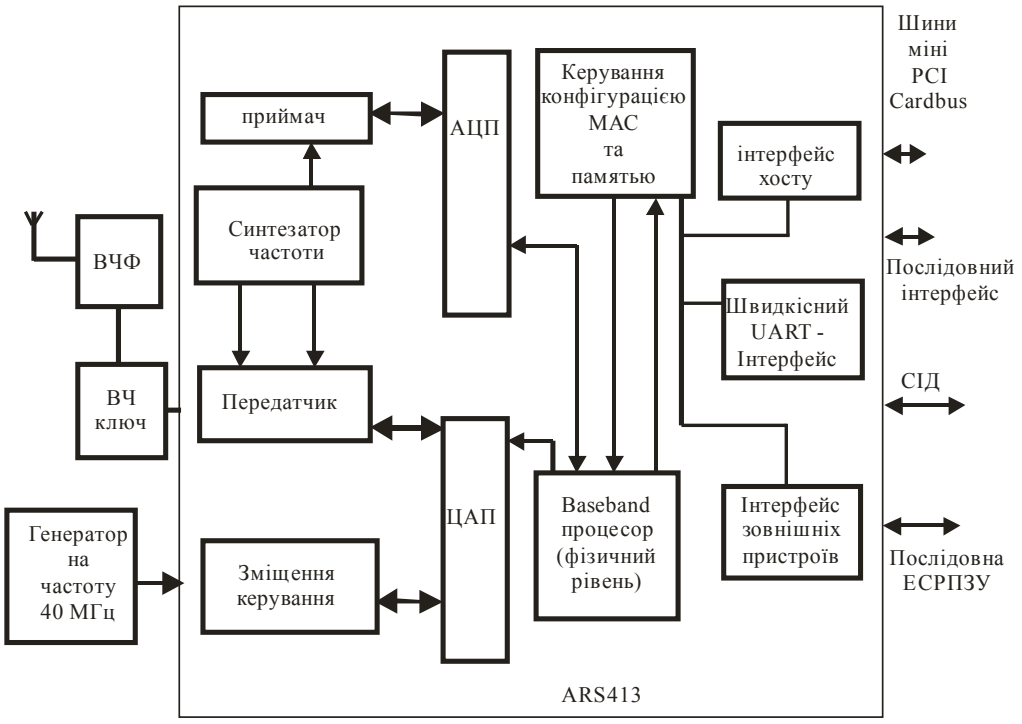


Рис. 3. Архітектура мікросхеми AR5413

В системах MIMO використовуються мікросхеми компанії IceFyre Semiconductor, як правило, на основі двох чіпсетів: одного – SureFyre стандарту 802.11a і другого – TwinFyre для підтримки всіх трьох

версій стандарту a, b і g. До складу чіпсета SureFyre входять:

- мікросхема MAC-контролера ICE5125 з малим енергоспоживанням, що підтримує версії 802.11a, b, h, l і надає гарантовану якість послуг передачі даних зі швидкістю понад 30 Мбіт/с (рис. 4). Архітектура контролера може масштабуватись для забезпечення швидкості передачі даних до 108 Мбіт/с;

- мікросхема фізичного рівня 802.11 типу ICE5351 (за твердженням розробників, на момент створення чіпсету – єдина однокристальна схема фізичного рівня стандарту 802.11a).

Удосконаливши конструкцію традиційного OFDM-модему, розробники компанії зуміли вмістити в мікросхему фізичного рівня ICE5351 три обчислювальних механізми: світловий відсікач (Light Clipper), що обмежує відношення пікової потужності до середньої потужності OFDM-сигналу до прийнятного рівня; адаптивне джерело попередніх спотворень; фазовий фрагментатор, який розбиває OFDM-сигнал передачі на безліч сигналів з постійною обвідною з відношенням пікової потужності до середньої потужності (рис. 5):

До складу чіпсета TwinFyre входять ті ж мікросхеми MAC-контролера ICE5125 і підсилювача потужності ICE5352, а також дводіапазонна мікросхема фізичного рівня типу ICE5825 з вбудованим baseband-процесором, що підтримує CCK модуляцію, і мікросхема радіомодуля стандарту 802.11 b/g типу ICE2501, що забезпечує роботу чіпсета в двох діапазонах.

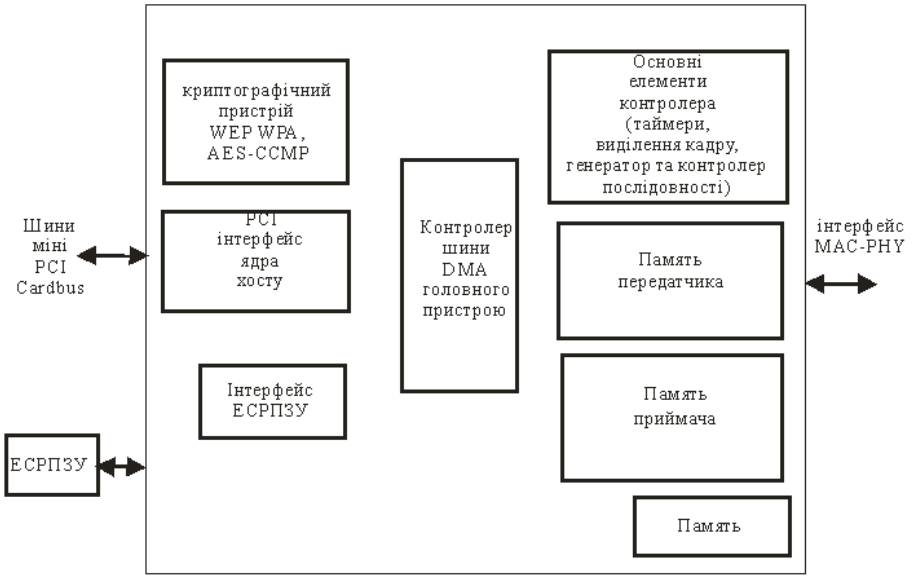


Рис. 4. Архітектура мікросхеми MAC типу ICE5125

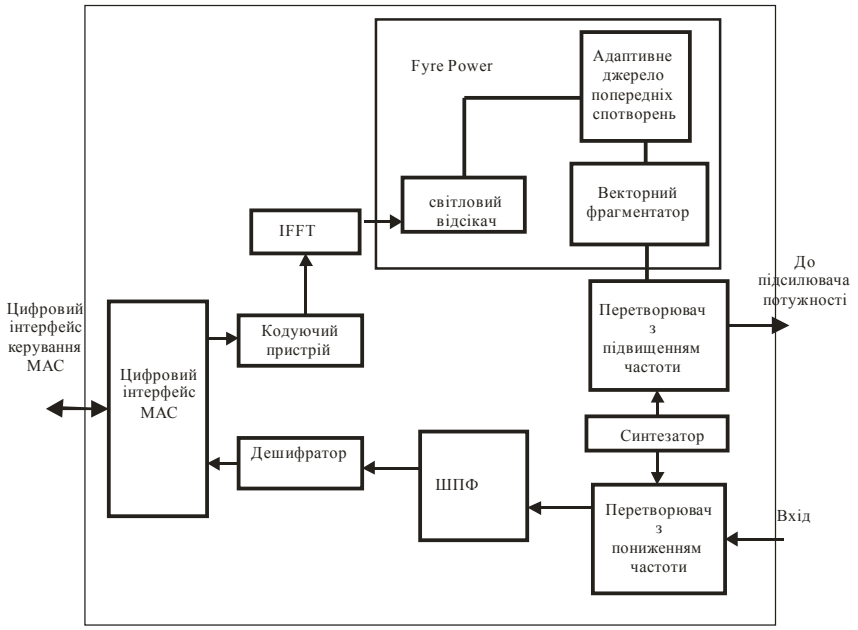


Рис. 5. Обчислювальні механізми чіпсетів SureFyre і TwinFyre

Вихідна пікова потужність обох чіпсетів перевищує 1,1 Вт при швидкості передачі 54 Мбіт/с. Чутливість приймача і лінійність сигналу передачі, відповідно, на 10 і 2 дБ краще, ніж в 802.11 стандарті.

Так, чутливість приймача при швидкості передачі 54 Мбіт/с становить -75 дБ (проти заданого стандартом рівня -65 дБ), при мінімальній швидкості передачі (6 Мбіт/с) вона дорівнює -95 дБ. Завдяки

допуску на розкид затримки, 150 нс, а також просторовому рознесенню антен і регулюванню потужності при кожній передачі пакета даних дальність в приміщенні при швидкості 54 Мбіт/с і з частотою появи помилок передачі 6% може перевищувати 40 м. При зовнішньому двоточковому з'єднанні дальність передачі при максимальній швидкості становить 2,9 км.

Висновки

В статті розглядається використання елементної бази в системах MIMO. На основі проведеного аналізу показано, що в системах MIMO в основному використовуються мікросхеми, які об'єднані в один чіпсет. Таке конструктивне виконання дає можливість зменшити енергоспоживання таких систем та знизити їх вартість. Виробники сучасних чіпсетів для мереж стандарту 802.11 працюють у напрямку збільшення дальності дії та пропускної спроможності систем MIMO, розширення їх динамічного діапазону та завадозахищеності. При цьому одним з основних напрямків робіт є оптимізація даних систем, підвищення їх енергоефективності. Найбільш цікавою виявилась мікросхема ICE5125, що має низьке енергоспоживання, високу чутливість, можливість регулювання потужності, що дозволяє підвищити робочу дальність у приміщені більше 40 метрів.

Література

1. Бакулин М. Г. Технология MIMO: принципы и алгоритмы / М. Г. Бакулин, Л. А. Варукина, В. Б. Крейнделин. – М. : Горячая линия - Телеком. 2014. – 242 с. – ISBN 978-5-9912-0457-6.

2. Вишневский В. М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В. М. Вишневский, А. И. Ляхов, С. Л. Портной, И. В. Шахнович. – М. : Техносфера. 2005. – 592 с.

3. Гула І.В. Застосування технології mimo для керування пристроями розумного дому / І.В. Гула, К.Л. Горященко, В.В. Мішан, Д.В. Кухар //Вісник Хмельницького національного університету. – 2016. – № 3. – С. 87–91

4. Гула І.В. Порівняння режимів передачі MIMO та SISO в бездротових мережах / І.В. Гула, К.Л. Горященко, В.В. Мішан // Вісник Хмельницького національного університету. – 2016. – № 6. – С. 257–260

5. Слюсар В.И. Системы MIMO: принципы построения и обработка сигналов / В.И. Слюсар // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2005. – № 8. – С. 52–58.

6. Слюсар В. SMART-антенны. Цифровые антенные решетки (ЦАР). MIMO-системы на базе ЦАР / В.М. Вишневский, А.Т. Ляхов, С.Л. Портной, И.В. Шахнович // Широкополосные беспроводные сети передачи информации. – М. : Техносфера, 2005. – С. 498–569.

References

1. Bakulyn M. H., Varukyna L. A. Kreindelyn V. B. Tekhnolohyia MIMO: pryntsypy y alhorytmy. – M.: Horiachaia lynyia - Telekom. 2014. – 242 s. – ISBN 978-5-9912-0457-6.

2. Vyshnevskyi V. M. Shyrokopolosnye besprovodnye sety peredachy ynformatsyy / V. M. Vyshnevskyi, A. Y. Liakhov, S. L. Portnoi, Y. V. Shakhnovych. – M.: Tekhnosfera. 2005. – 592 s.

3. Hula I.V. Zastosuvannia tekhnolohii mimo dlia keruvannia prystroiamy rozumnoho domu / I.V. Hula, K.L. Horiashchenko, V.V. Mishan, D.V. Kukhar // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2016. – Issue 3. – S. 87–91.

4. Hula I.V. Porivniannia rezhymiv peredachi MIMO ta SISO v bezdrotovykh merezhakh / I.V. Hula, K.L. Horiashchenko, V.V. Mishan // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2016. – Issue 6. – S. 257–260

5. Sliusar V.Y. Systemy MIMO: pryntsypy postroenyia y obrabotka syhnalov // Elektronyka: nauka, tekhnolohyia, byznes. – 2005. – Vol. 8. – S. 52–58.

6. Sliusar Vadym. SMART-antenny. Tsyfrovye antennыe reshetky (TsAR). MIMO-systemy na baze TsAR. V knyhe «Shyrokopolosnye besprovodnye sety peredachy ynformatsyy» / Vyshnevskyi V.M., Liakhov A.T., Portnoi S.L. Shakhnovych Y.V. – M. : Tekhnosfera, 2005. – S. 498–569 (2005).

Рецензія/Peer review : 03.11.2017 р. Надрукована/Printed :05.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Полікаровських О.І.

УДК 621.317

В.С. ПЕТРУШАК , С.В. САМОЛЮК
Хмельницький національний університет

РОЗРОБКА ЦИФРОВОГО ГЕНЕРАТОРА ПЕРІОДИЧНИХ СИГНАЛІВ НА БАЗІ ПРЯМОГО МЕТОДУ СИНТЕЗУ ЧАСТОТИ І ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ЙОГО ФУНКЦІОНАЛЬНИХ БЛОКІВ

Запропоновано структурну схему та наведено опис роботи цифрового генератора періодичних сигналів на базі прямого методу синтезу частоти. Досліджено роботу функціональних блоків, що увійшли до складу цифрового генератора: суматора, регістра, подільника частоти, реверсивного лічильника, таблиці перекодування, схеми керування, цифро-аналогового перетворювача. Представлені осцилограми, які підтверджують працездатність функціональних блоків.

***Ключові слова**: цифровий генератор, періодичний сигнал, прямий метод синтезу частоти, цифро-аналогове перетворення.*

V.S. PETRUSHAK , S.V. SAMOLUK
Khmelnytskyi National University

DEVELOPMENT OF DIGITAL OSCILLATOR OF PERIODIC SIGNALS ON THE BASIS OF DIRECT DIGITAL SYNTHESIS AND INVESTIGATION OF THE WORK OF ITS FUNCTIONAL BLOCKS

The main purpose of the digital oscillator is the formation of periodic signals of various shapes. Modern digital oscillators based on the direct method of frequency synthesis operate in the range from a fraction of hertz to tens and hundreds of gigahertz. They are used in equipment of different function, replacing it with simple auto-oscillators. At the same time, such oscillators are characterized by all the disadvantages of digital signal processing devices: quantization noise, overlaying of spectra of a digital signal, limited upper working frequency.

Therefore, the development of digital oscillators of periodic signals based on the direct method of frequency synthesis using multipliers that would occupy an intermediate position among the known and characterized by a simple and non-expensive implementation scheme is today relevant. A structural scheme is proposed and a description of the operation of the digital oscillator of periodic signals based on the direct method of frequency synthesis is given. In the structural scheme: the clock oscillator, forms a sequence of rectangular pulses of a certain frequency; frequency divider, divides the clock frequency by 1024; multiplier multiplies the clock frequency by 4 times; reverse counter, forms a binary code; the register keeps a certain value of the binary code; Adder adds binary codes that come from the register and the reverse counters; control scheme, sets the form of the periodic signal; digital transcripts of a sinusoidal, rectangular or pollen signal are stored in the transcoding table; the digital-to-analogue converter converts the binary value of the periodic signal to a certain value of current. The work of functional blocks included in the digital generator: adder, register, frequency divider, reversing counter, transcoding tables, control circuits, digital-to-analogue converter were investigated. Presenting oscillograms, which confirm the functional capacity of the functional units. Digital part of the circuit of the digital generator is made on the programmable logic integrated circuit of the series Cyclone III EP3C5E144C8. The multiplier uses the ALTPLL megapixel, which is a block of phase-locked loops.

***Keywords:** digital oscillator, periodic signal, direct digital synthesis, digital-to-analogue conversion.*

Вступ

Сучасні цифрові генератори на базі прямого методу синтезу частоти працюють у діапазоні від долей герц до десятків і сотень гігагерц. Вони використовуються в апаратурі різного призначення, замінюючи в ній прості автогенератори. Така заміна дає наступні переваги:

- істотно підвищується точність налаштування і стабільність частоти;
- спрощується процес налаштування апаратури;
- з'являється можливість програмного переналаштування частоти й істотно збільшується швидкість зміни робочої частоти;
- відкриваються нові можливості цифрового формування модульованих радіосигналів;
- в деяких схемах синтезаторів вдається покращити спектральну чистоту сигналів у порівнянні зі звичайними автогенераторами;
- покращуються масогабаритні характеристики і надійність пристрою.

Разом з тим, таким генераторам властиві всі недоліки цифрових пристроїв обробки сигналів: шум квантування, накладення спектрів цифрового сигналу, обмежена верхня робоча частота [1].

Тому розробка цифрових генераторів періодичних сигналів на базі прямого методу синтезу частоти з використанням помножувачів, які б зайняли проміжне положення серед відомих та характеризувались нескладною та не високовартісною схемою реалізації, є на сьогодні актуальним.

Експериментальна частина

Основне призначення цифрового генератора (ЦГ) – формування періодичних сигналів різної форми. Структурна схема ЦГ періодичних сигналів на базі прямого методу синтезу частоти представлена на рис. 1. В цій схемі: тактовий генератор, формує послідовність прямокутних імпульсів певної частоти; подільник частоти, ділить тактову частоту на 1024; помножувач, перемножує тактову частоту в 4 рази; реверсивний лічильник, формує двійковий код; в регістрі зберігається певне значення двійкового коду; суматор додає двійкові коди, що надходять з регістра і реверсивного лічильника; схема керування, задає форму періодичного сигналу; в таблиці перекодування зберігаються цифрові відліки синусоїдального, прямокутного чи пилкоподібного сигналу; цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) перетворює двійкове

значення періодичного сигналу в певне значення струму.

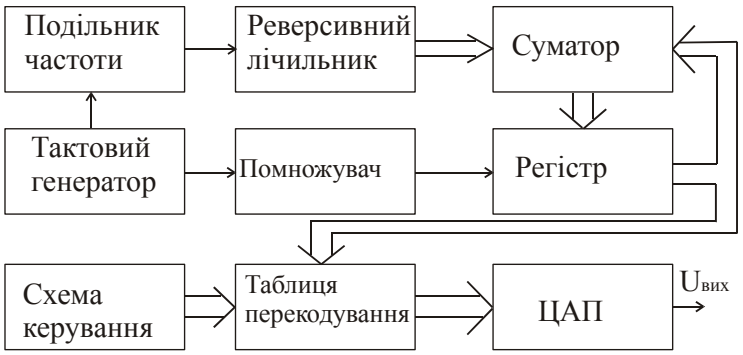


Рис. 1. Структурна схема ЦГ періодичних сигналів на базі прямого методу синтезу частоти

Працює ЦГ періодичних сигналів на базі прямого методу синтезу частоти наступним чином:

Тактова частота, розділена на 1024, надходить на реверсивний лічильник. Якщо на вхід plus реверсивного лічильник подано високий рівень, то відбувається збільшення двійкового коду на його виході. Якщо ж високий рівень подано на вхід minus – то зменшення. Ділення частоти відбувається за допомогою 10-розрядного лічильника.

Двійковий сигнал з реверсивного лічильника надходить на вхід суматора. В суматорі відбувається складання двійкового коду, який надійшов з реверсивного лічильника з двійковим кодом, який зберігається в регістрі. При цьому значення двійкового коду в регістрі поновлюється з тактовою частотою, помноженою в чотири рази.

Разом з тим двійковий код з семи старших розрядів регістра надходить на вхід таблиці перекодування, яка представляє собою дешифратор. Залежно від двійкового коду на входах дешифратора sinsaw і square, на виході дешифратора формуються цифрові відліки миттєвих значень сигналів: синусоїдальної, прямокутної і пилкоподібної форми. Формування двійкового коду на входах дешифратора sinsaw і square відбувається за допомогою схеми керування, яка представляє собою дворозрядний лічильник, що складається з двох D-тригерів.

З виходу таблиці перекодування двійковий код надходить на ЦАП, де перетворюється в аналогове значення періодичного сигналу. ЦАП виконано на резистивній матриці R-2R.

Серцем даної схеми є акумулятор фази, який складається з суматора і регістра, осцилограми роботи яких представлені на рис. 2 і рис. 3 відповідно.

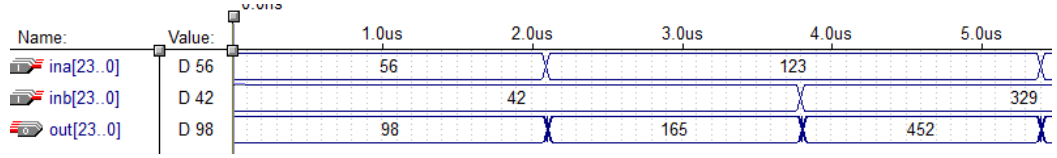


Рис. 2. Осцилограми роботи суматора

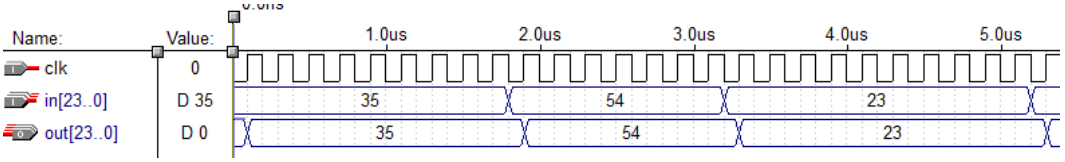


Рис. 3. Осцилограми роботи регістра

Формування кодів частоти періодичного сигналу відбувається за допомогою двійкового реверсивного лічильника, осцилограми роботи якого представлено на рис. 4.

Рис. 4. Осцилограми роботи реверсивного лічильника

Для ділення тактової частоти використано три чотирирозрядні лічильники марки 74393М. Схема подільника частоти представлена на рис. 5, а осцилограми його роботи – на рис. 6.

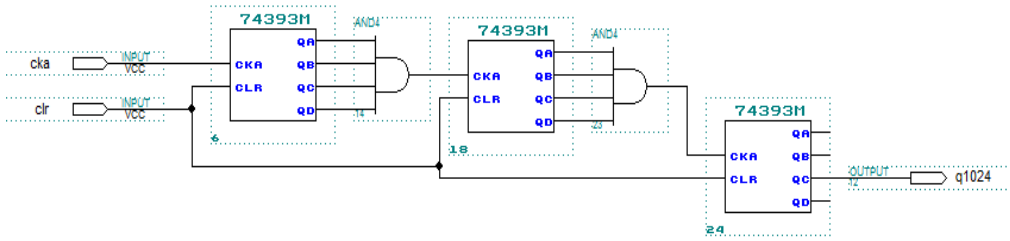


Рис. 5. Схема подільника частоти

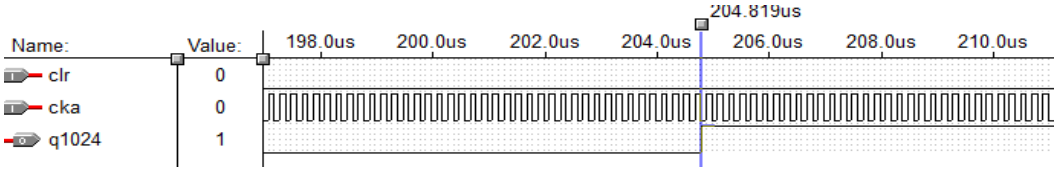


Рис. 6. Осцилограми роботи подільника частоти

Блок таблиці перекодування представляє собою дешифратор, який виконано на мові AHDL. Осцилограми роботи таблиці перекодування представлено на рис. 7.

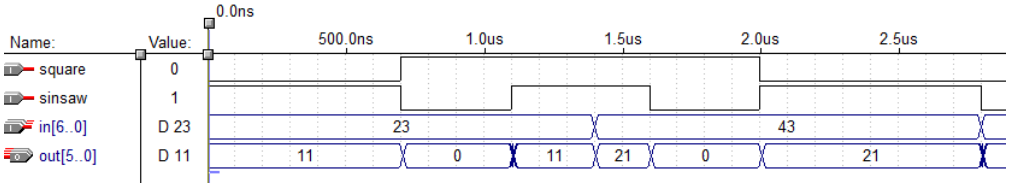


Рис. 7. Осцилограми роботи таблиці перекодування

Керування станом таблиці перекодування відбувається за допомогою схеми, яку представлено на рис. 8, а осцилограми її роботи – на рис. 9.

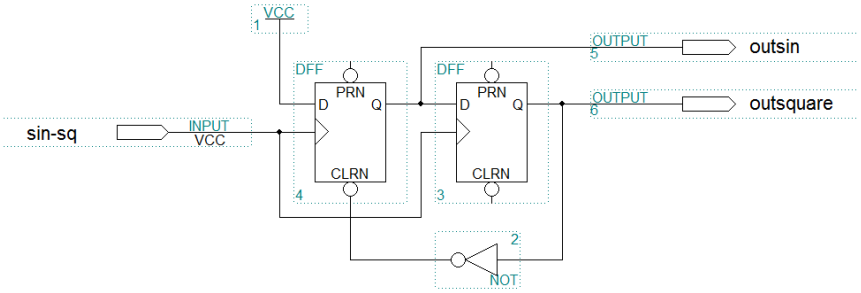


Рис. 8. Схема керування

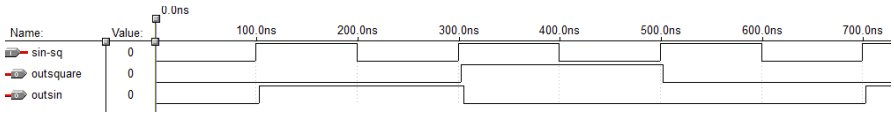


Рис. 9. Осцилограми роботи схеми керування

В даній схемі використано шестирозрядний ЦАП на основі резистивної матриці R-2R, схема якого представлена на рис. 10 [2].

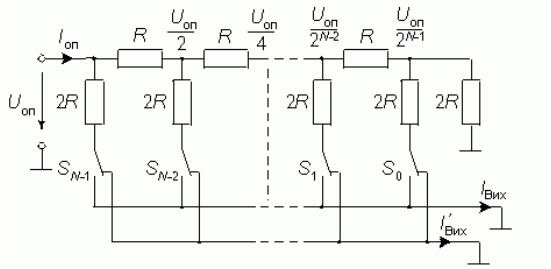


Рис. 10. Схема ЦАП з перемикачами та матрицею постійного імпедансу

З виходу ЦАП сигнал надходить у вигляді струму, тому його необхідно перетворити у напругу. Для

цих цілей краще використати перетворювач на ОП. В такому випадку сигнал не тільки перетвориться у напругу, але й підсилиться. Схема перетворювача на основі ОП AD8047AR представлена на рис. 11, а осцилограми на його виході – на рис. 12.

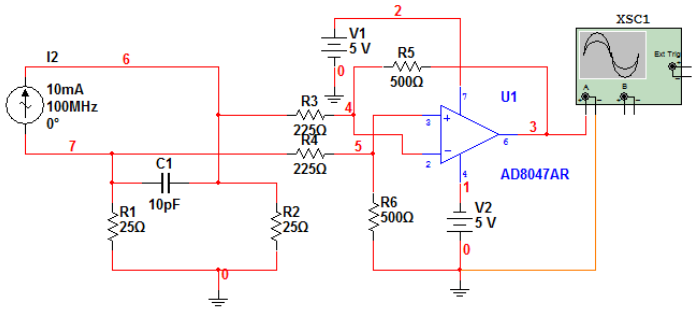


Рис. 11. Схема перетворювача струму в напругу

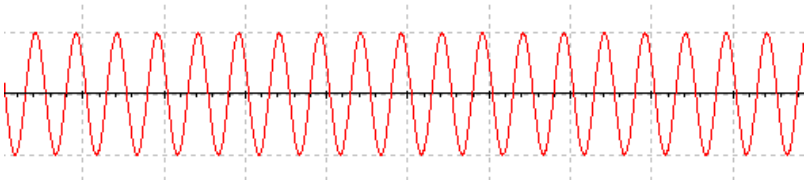


Рис. 12. Осцилограма на виході перетворювача струму в напругу

Цифрова частина схеми ЦГ виконана на програмованій логічній інтегральній схемі (ПЛІС) серії Cyclone III EP3C5E144C8 [3]. В якості помножувача використано мегафункцію ALTPLL, що представляє собою блок фазового автоналаштування частоти.

Висновки

1. Запропоновано структурну схему та наведений опис роботи цифрового генератора періодичних сигналів на базі прямого методу синтезу частоти.

2. Досліджено роботу функціональних блоків, що увійшли до складу цифрового генератора: суматора, регістра, подільника частоти, реверсивного лічильника, таблиці перекодування, схеми керування, цифро-аналогового перетворювача.

3. Представлені осцилограми, які підтверджують працездатність функціональних блоків.

Література

1. Манассевич В. Синтезаторы частот (Теория и проектирование) / В. Манасевич ; пер. с англ. ; под ред. А. С. Галина. – М. : Связь 1979. – 394 с.

2. Опадчий Ю. Ф. Аналоговая и цифровая электроника. (Полный курс) / Ю. Ф. Опадчий, О. П. Глудкин, А. И. Гуров. – М. : "Горячая Линия-Телеком", 1999. – 768 с.

3. Огляд ПЛІС серії Cyclone III [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.altera.com/products/fpga/cyclone-series/cyclone-iii/overview.html.

References

1. Manassevich V. Sintezatory chastot (Teoriya i proyektirovaniye) / V. Manasevich ; per. s angl. ; pod red. A. S. Galina. – M. : Svyaz 1979. – 394 s.

2. Opadchiy Yu. F. Analogovaya i tsifrovaya elektronika. (Polnyy kurs) / Yu. F. Opadchiy. O. P. Gludkin. A. I. Gurov. – M. : "Goryachaya Liniya-Telekom", 1999. – 768 s.

3. Ogliad PLIS serii Cyclone III [Elektronniy resurs]. – Rezhim dostupu : https://www.altera.com/products/fpga/cyclone-series/cyclone-iii/overview.html.

Рецензія/Peer review : 03.11.2017 р. Надрукована/Printed :01.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Полікаровських О. І.

УДК 681.3

М.М. КАСЯНЧУК, І.З. ЯКИМЕНКО, С.В. ІВАСЬЄВ, Н.М. МАНДЕБУРА, В.М. НЕМІШ
Тернопільський національний економічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК АПАРАТНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДІВ ПОШУКУ ОБЕРНЕНОГО ЕЛЕМЕНТА ЗА МОДУЛЕМ

В роботі розроблені методи пошуку оберненого елемента за модулем, які ґрунтуються на покроковому додаванні залишку, що дозволяє уникати складних операцій та проводити обчислення над числами значно меншої розрядності в порівнянні з класичним підходом на основі алгоритму Евкліда та його наслідку. Реалізовано програмно-апаратні модулі зазначених методів на базі середовища розробки Aldec Active-HDL 9.1, та проведені дослідження часових характеристик, які вказують на переваги запропонованого методу.

Ключові слова: обернений елемент за модулем, алгоритм Евкліда, програмно-апаратні модулі, середовище Aldec Active-HDL 9.1.

M. KASIANCHUK, I. YAKYMENKO, S. IVASIEV, N.M. MANDEBURA, V.M. NEMISH
Ternopil National Economic University

RESEARCH OF TIME CHARACTERISTICS OF VEHICLE REALISATION OF THE SEARCHING METHODS OF THE INVERSE ELEMENT BY THE MODULE

The analysis of existing methods of the inverse element search by module was made and practical implementation was defined in the work, namely at multiplying the elliptic curve point by a number in affine coordinates over the field GF(p), in Diffie-Helman keys exchange protocols, asymmetric algorithms of RSA, El Gamal, Rabin information protection, the system of remainder classes, data encryption, to improve performance of wireless sensor networks, computing optimization in the methods of finding the largest common divisor, modular multiplication, exponentiation and factorization. It was established that existing approaches have certain functional limitations and are characterized with high temporal complexity, so the authors developed the search method of the reversed element by module, which is based on the step by step addition of the remainder and allows to avoid complex operations, that is to carry out calculations with the numbers with much smaller bit capacity in comparison with the classic approach based on Euclidean algorithm and its consequence. Block diagram of the proposed algorithm work was shown and hardware and software modules of these methods based on the Aldec Active-HDL 9.1 development environment were realized. The fragments of UML diagrams of designed devices of the reverse element search by module and time diagrams of their work were offered. Research of time characteristics, which point out the benefits of the search method of the inverse element by module, based on the step by step addition of the remainder, was conducted. Analytical expressions of time complexity characteristics were obtained and their graphic dependencies were built. It was established that efficiency of application of the developed method of the inverse element SEARCH by module defines the prospects for its application, in particular in asymmetric information security systems and development of the appropriate high-performance software and hardware.

Keywords: inverse element under modulo, Euclidean algorithm, software and hardware modules, Aldec Active-HDL 9.1 environment.

Вступ

Сучасні системи захисту інформаційних потоків у комп'ютерних мережах, які забезпечують необхідний рівень стійкості до різного виду атак, як правило, функціонують в реальному масштабі часу [1]. У зв'язку з цим програмні бібліотеки криптографічних перетворень [2] повинні задовольняти жорстким вимогам забезпечення необхідної швидкодії базових операцій [3, 4] в асиметричних системах захисту на етапах генерування ключів, шифрування та дешифрування. Однією з найбільш трудомістких та найбільш поширених операцій є пошук оберненого елемента у кільці лишків за модулем [5].

Ця операція багатократно використовується при виконанні множення точки еліптичної кривої на число у афінних координатах над полем GF(p) [6], у методі Діффі-Хелмана обміну ключами [4], криптоалгоритмах RSA, Ель-Гамаля [8], Рабіна [9], системі залишкових класів [10–12], кодуванні даних [13], для підвищення ефективності роботи безпровідних сенсорних мереж [14], оптимізації обчислень в методах знаходження найбільшого спільного дільника, модулярного множення [3], експоненціювання [4] та факторизації [15]. Тому є актуальною задача дослідження існуючих та розробки нових методів пошуку мультиплікативно оберненого елемента у кільці лишків за модулем.

Для вирішення цього завдання можуть застосовуватися як алгоритмічні (математичні), так і програмно-апаратні методи оптимізації. Найкращих результатів можна добитися при спільному використанні обох цих підходів.

Огляд відомих рішень

Обернений елемент за модулем для ненульового елемента a простого поля *GF(p)* є розв'язком рівняння $(a \cdot b) \bmod p = 1$, заданого в полі натуральних чисел $N\{+,\cdot\}$, причому розв'язок $a^{-1} \bmod p = b$ також є елементом поля GF(p) [16].

Найпростішим методом пошуку оберненого елемента $a^{-1} \bmod p = b$ є простий перебір всіх ненульових елементів простого поля *GF(p)* з перевіркою кожного з них згідно умови $(a \cdot b) \bmod p = 1$. Однак він характеризується значною обчислювальною складністю.

Процедура пошуку оберненого елемента за модулем на основі алгоритму Евкліда полягає в наступному. З одного боку умова $(a \cdot b) \bmod p = 1$ еквівалентна виразу $a \cdot b - p \cdot t = 1$, де t - частка від ділення $a \cdot b$ на просте число p. З іншого боку, розширений алгоритм Евкліда дозволяє знайти найбільший спільний

дільник $НСД(a, p)$ для чисел a і p, а також g і h такі, що $a \cdot g + p \cdot h = НСД(a, p)$ Оскільки обернений елемент за модулем існує тільки у випадку, коли a і p – взаємно прості, то $a \cdot g + p \cdot h = 1$.

Для знаходження оберненого елемента за модулем можна також скористатися теоремою Ейлера ($a^{\varphi(p)} \equiv 1 \bmod p$), яка вірна для випадку взаємно простих a і p. Звідси $a^{\varphi(p)-1} \bmod p \equiv a^{-1} \bmod p$. Даний метод зводиться до задачі модулярного експоненціювання, що ускладнює процес пошуку для багаторозрядних чисел.

Мета роботи

Метою даної роботи є розробка ефективного методу пошуку оберненого елемента за модулем, реалізація відповідних програмно-апаратних застосувань на базі середовища розробки Aldec Active-HDL 9.1 та проведення дослідження часових характеристик запропонованого та класичного методів.

Ефективні методи знаходження оберненого елемента за модулем

Для знаходження оберненого елемента за модулем a^{-1}mod p, де $a<p$ і НСД(a, p)=1 пропонується такий метод. Спочатку обчислюється $a_0=p \bmod a \neq 0$. Далі послідовно виконується операція додавання:

$$\begin{gathered} a_1=(a_0+1) \bmod a; \\ a_2=(a_1+a_0) \bmod a=(2 \cdot a_0+1) \bmod a; \\ \ldots ; \\ a_i=(a_{i-1}+a_0) \bmod a=(i \cdot a_0+1) \bmod a; \end{gathered} \quad (1)$$

Описана процедура продовжується до тих пір, поки деяке число a_i не стане рівним нулю. Тоді обернений елемент визначається за формулою:

$$K = a^{-1} \bmod p = \frac{i \cdot p + 1}{a}. \quad (2)$$

На рис. 1 представлена блок-схема роботи даного алгоритму, а в таблиці 1 – приклад пошуку 101^{-1}mod167 запропонованим методом. В першому рядку записуються значення кількості кроків виконання алгоритму, а в другому значення a_i це продовжується до тих пір, поки деяке число $a_i=0$. В нашому випадку потрібно проробити 26 кроків для обчислення оберненого елемента за модулем.

Таблиця 1

Приклад пошуку 101^{-1}mod167 запропонованим методом

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8
a_i	66	67	32	98	63	28	94	59	24
i	9	10	11	12	13	14	15	16	17
a_i	90	55	20	86	51	16	82	47	12
i	18	19	20	21	22	23	24	25	26
a_i	78	43	8	74	39	4	70	35	0

Згідно виразу (2), з таблиці 1 випливає: $K = 101^{-1} \bmod 167 = \frac{26 \cdot 167 + 1}{101} = 43.$

Основними операціями, які багаторазово повторюються при обчисленні оберненого елемента за модулем, є пошук залишків та додавання. Першу з них (p mod a) пропонується виконувати таким чином. Число p записується у двійковій формі: $p=p_{n-1} \cdot 2^{n-1}+\ldots+p_i \cdot 2^i+\ldots+p_1 \cdot 2^1+p_0 \cdot 2^0$, де $p_i=0,1$. Далі формується таблиця 2, у якій $p_{1i}=2^i \bmod a$.

Таблиця 2

Знаходження залишків степенів двійки

2^{n-1}	2^{n-2}	…	2^i	…	2	1
p_{n-1}	p_{n-2}	…	p_i	…	p_1	p_0
$p_{1\,n-1}$	$p_{1\,n-2}$	…	$p_{1\,i}$	…	$p_{1\,1}$	$p_{1\,0}$

Пошук p_{1i} здійснюється домноженням на 2 попереднього елемента p_{1i-1} (дописуванням нуля в молодший розряд числа p_{1i-1} у двійковій формі) та порівнянням з модулем p:

$$p_{1i} = \begin{cases} 2 \cdot p_{1\,i-1}, & 2 \cdot p_{1\,i-1} < p \\ 2 \cdot p_{1\,i-1} - p, & 2 \cdot p_{1\,i-1} \geq p. \end{cases} \quad (3)$$

Шуканий залишок буде дорівнювати сумі тих p_{1i}, для яких відповідні p_i рівні 1. В таблиці 3 наведено приклад пошуку залишку 167 mod 101 вказаним методом без використання громіздкої операції ділення.

Таблиця 3

Приклад пошуку залишку 167 mod 101

p_{1i}	27	64	32	16	8	4	2	1
p_i	1	0	1	0	0	1	1	1

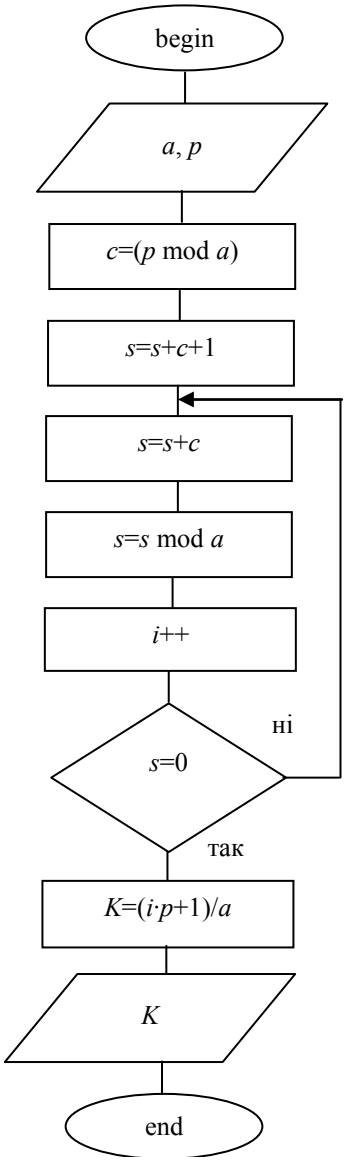


Рис.1. Блок-схема роботи запропонованого алгоритму

З врахуванням вищесказаного 167 mod 101=(27+32+4+2+1) mod 101=66.
В таблиці 4 представлена часова складність основних операцій запропонованого алгоритму

Таблиця 4

Часова складність базових операцій запропонованого алгоритму

№	Основні операції	Часова складність запропонованих алгоритмів
1.	$i \cdot a_{10}+1$	$O(i \cdot n)$
2.	$(i \cdot a_{10}+1) \bmod a_3$	$O\left(i \cdot \left(\frac{n}{2}+\log_2 n/2\right)\right)$

Загальна часова складність пошуку оберненого елемента запропонованим методом, вважаючи max $i=log_2 n$, становить $O1\left(\frac{n \cdot \log_2 n}{2}+\log_2 n \cdot \log_2 n/2\right)$. Класичний метод з використанням розширеного алгоритму Евкліда приводить до такого результату: $O(n^3)$ [17]. На рис. 2 представлено залежності часових складностей класичного (графік різко зростає) і запропонованого (графік зростає набагато повільніше в порівнянні з попереднім) методів в логарифмічній шкалі з основою 10.

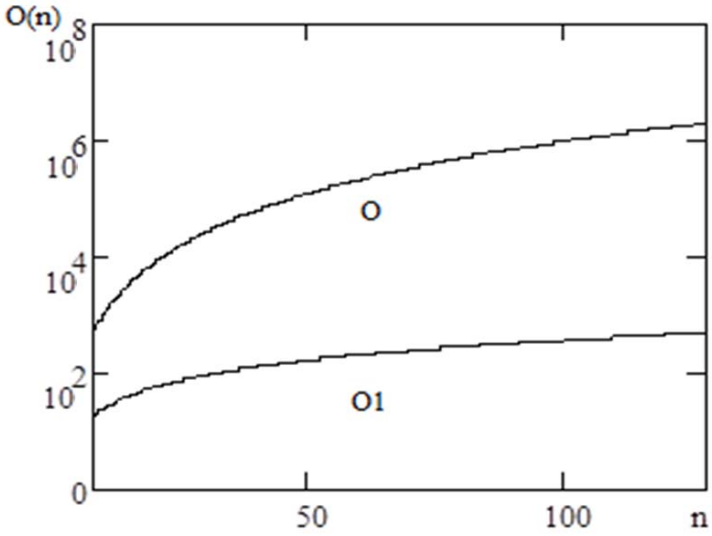


Рис. 2. Графічні залежності часових складностей і запропонованого методів

Отже, розроблений метод дозволяє уникати складних операцій, зокрема, ділення з остачею, та проводити обчислення над числами значно меншої розрядності в порівнянні з класичним методом пошуку оберненого елемента за модулем з використанням алгоритму Евкліда та його наслідку.

Дослідження часових характеристик апаратної реалізації методів пошуку оберненого елемента за модулем

Для експериментального дослідження часових затрат пошуку оберненого елемента за модулем з використанням розширеного алгоритму Евкліда та запропонованого методу для кожного з них було здійснено програмно-апаратну реалізацію на базі середовища розробки Aldec Active-HDL 9.1. Фрагменти UML-діаграм спроектованих пристроїв, на яких вказані усі стандартні бібліотеки та компоненти для їх коректної роботи, представлено на рисунку 3.

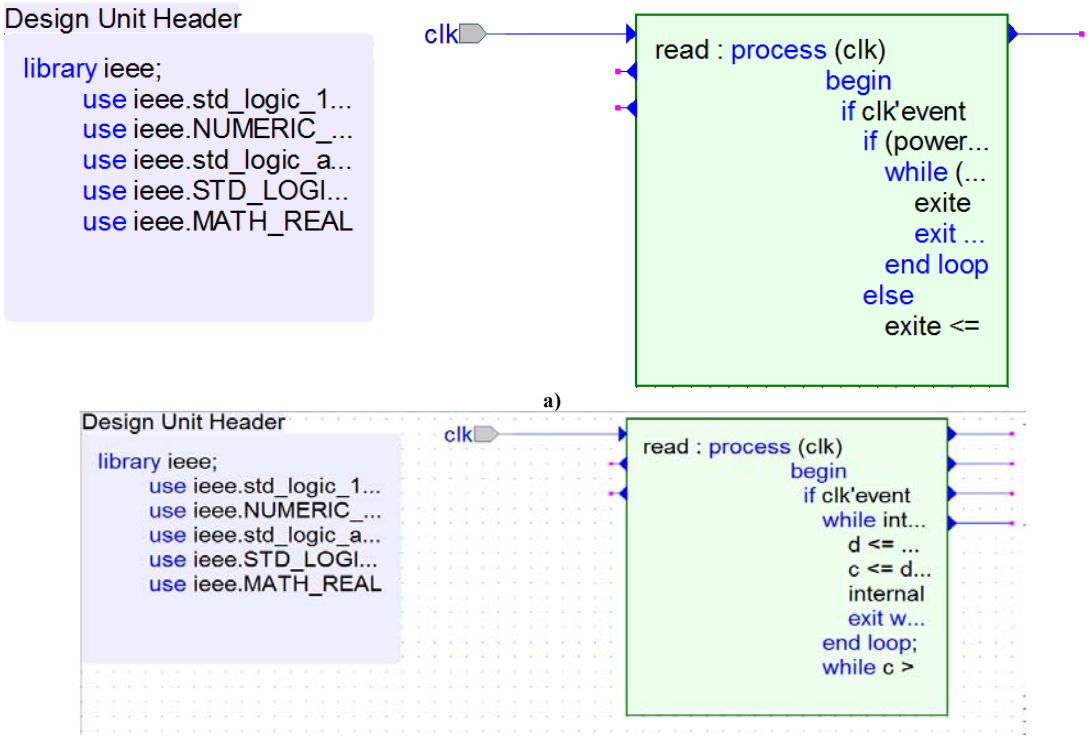
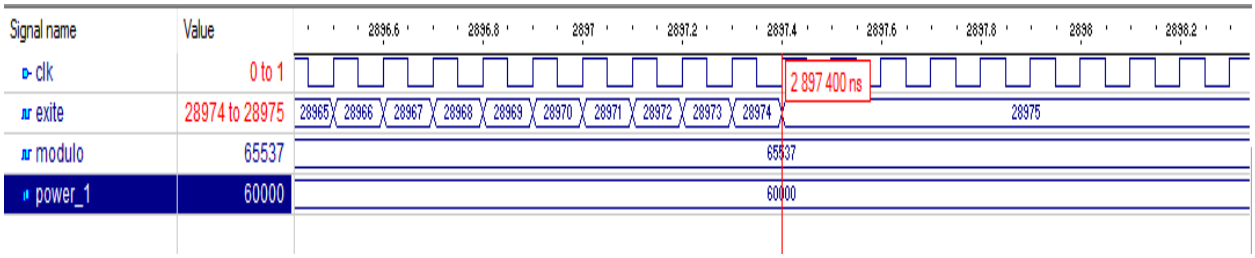
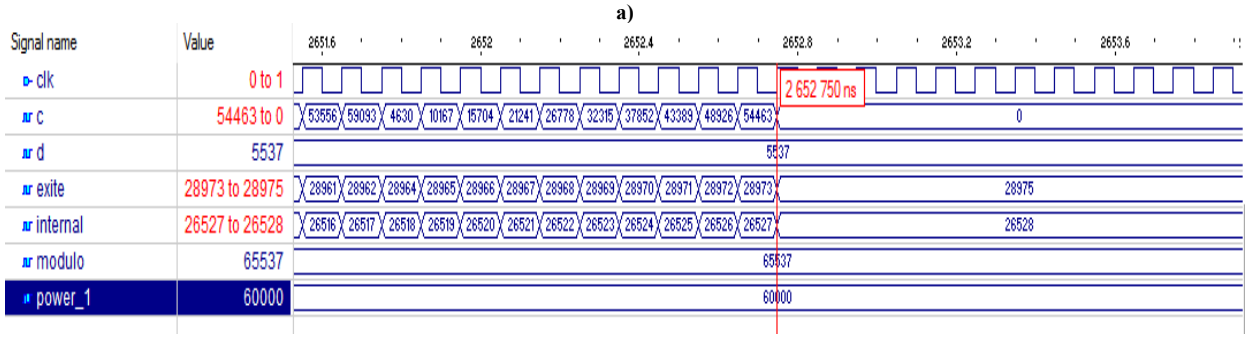


Рис. 3. Фрагменти UML-діаграм спроектованих пристроїв пошуку оберненого елемента за модулем: а) на основі алгоритму Евкліда; б) на основі запропонованого методу

На рисунку 4 представлено часові діаграми роботи спроектованих пристроїв пошуку оберненого елемента за модулем (для прикладу було вибрано $60000^{-1}\text{mod}65537$) на основі розширеного алгоритму Евкліда та запропонованого методу.



а)



б)

Рис. 4. Часова діаграма пошуку оберненого елемента за модулем:
а) на основі алгоритму Евкліда; б) на основі запропонованого методу

Наведений приклад ілюструє, що час роботи системи зменшився із 2,8974 мс (на основі алгоритму Евкліда) до 2,65275 мс (на основі запропонованого методу додавання залишків), тобто приблизно в 1,09 разів.

При дослідженні часових параметрів програмно-апаратної реалізації вищеназваними методами число p=65537 вибиралося простим і фіксованим, щоб для будь-якого $a<p$ існував обернений елемент. Число a змінювалося від 5000 до 65000 з кроком 5000. Результати чисельного експерименту наведено в таблиці 5.

Таблиця 5

Порівняльні характеристики часових затрат обчислення оберненого елемента за модулем в середовищі розробки Aldec Active-HDL 9.1

N п/п	a	$a^{-1}\mathrm{mod}p$	Час роботи, *ns*	
			Алгоритм Евкліда та його наслідок	Метод додавання залишку
1	5000	20015	201300	113540
2	10000	42776	4277500	652750
3	15000	50363	5036200	1152750
4	20000	21388	2138700	652750
5	25000	4003	400200	152750
6	30000	57950	5794900	2652750
7	35000	40309	4030800	2152750
8	40000	10694	1069300	3552750
9	45000	60479	5542000	6553550
10	50000	34770	3476900	2652750
11	55000	37567	3756600	3152750
12	60000	28975	2897400	2652750
13	65000	56994	4845000	3553450
Середній час	-	-	3343600	2280619

На рис. 5 представлені графічні залежності часових затрат пошуку оберненого елемента класичним (графік 1) та запропонованим (крива 2) методами згідно таблиці 5, а також усереднені значення отриманих результатів (прямі 3 та 4 відповідно).

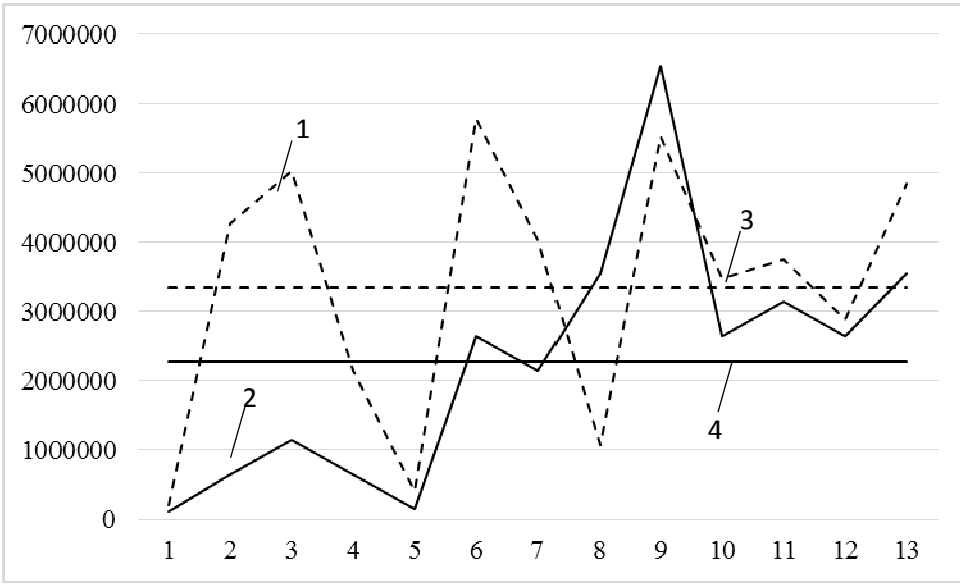


Рис. 5. Часові характеристики VHDL-реалізації класичного (штрихові лінії) та запропонованого (суцільні лінії) методів пошуку оберненого алгоритму за модулем

Результати проведених досліджень показують, що тільки у двох із тринадцяти випадків при a=40000 та a=45000 запропонований метод поступається класичному, що пояснюється необхідністю виконання великої кількості операцій додавання. Середній час пошуку оберненого елемента за модулем за допомогою алгоритму Евкліда (3343600 ns) в 1,47 разів більший від аналогічного параметра з використанням додавання залишків (2280619 ns).

Висновки

В роботі здійснено експериментальне порівняння часових затрат пошуку оберненого елемента за модулем на основі розширеного алгоритму Евкліда та запропонованого методу додавання залишку, який дозволяє уникати виконання складних арифметичних операцій та проводити обчислення над числами значно меншої розрядності. Реалізація програмно-апаратних модулів зазначених алгоритмів на базі середовища розробки Aldec Active-HDL 9.1 показала, що середній час пошуку оберненого елемента за модулем класичним методом в 1,47 рази більший від аналогічного параметра з використанням запропонованого методу. Отримано аналітичні вирази характеристик часової складності та побудовано їх графічні залежності. Ефективність застосування розробленого методу пошуку оберненого елемента за модулем визначає перспективи щодо його застосування, зокрема в асиметричних системах захисту інформації, та розробки відповідних високопродуктивних програмно-апаратних засобів.

Література

1. Ma Q. An integrated framework for information security management / Q. Ma, B. M. Schmidt, J. M. Pearson // Review of Business. Retrieved – 26 October 2013. – P. 58–69.

2. Stallings W. Cryptography and Network Security: Principles and Practice. 5th Prentice Hall Press Upper Saddle River, NJ, USA. 2010. – 719 p.

3. Николайчук Я.М. Векторно-модульний метод множення багаторозрядних чисел в базисі Радемахера-Крестенсона / Я.М. Николайчук, М.М. Касянчук, І.З. Якименко, С.В. Івасьєв // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Комп'ютерні системи та мережі. – 2014. – № 694. – С. 118–125.

4. Kozaczko D. Vector Module Exponential in the Remaining Classes System / D. Kozaczko, M. Kasianchuk, I. Yakymenko, S. Ivasiev / Proceedings of the 2015 IEEE 8th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS–2015), Warsaw, Poland, V.1, September – 2015, p. 161–163.

5. Kasyanchuk M.M. Foundations for the Analytical Computation of Coefficients of Basic Numbers of Krestenson's Transformation / M.M. Kasyanchuk, Ya. M. Nykolaychuk, I. Z. Yakymenko / Cybernetics and Systems Analysis. – September, 2014. – Volume 50, Issue 5. – pp. 649–654.

6. Hankerson D. Guide to Elliptic Curve Cryptography / D. Hankerson, A. Menezes, V. Scott / Springer-Verlag New York, USA, 2004, 311 p.

7. Koblitz N. Another look at non-standard discrete log and Diffie-Hellman problems / N. Koblitz, A. Menezes // Cryptology ePrint Archive. Report 2007/442, 2007. URL: http://eprint.iacr.org/.

8. Якименко І.З. Теорія алгоритмів RSA та Ель–Гамаля в розмежованій системі числення Радемахера–Крестенсона / І.З. Якименко, М.М. Касянчук, О.І. Волинський, І.Р. Пітух // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2011. – № 3. – С. 265–273.

9. Касянчук М.М. Модифікований метод шифрування Рабіна з використанням різних форм системи

залишкових класів / М.М. Касянчук, І.З. Якименко, Л.О. Дубчак, Н.А. Рендзеняк, Н.М. Мандебура // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 1(245). – С. 127–131.

10. Kasianchuk M. N. Theoretical Foundations of the Modified Perfect form of Residue Number System / M. N. Kasianchuk, Ya. N. Nykolaychuk, I.Z. Yakymenko / Cybernetics and Systems Analysis, 2014, p. 219-223.

11. Kasianchuk M. N. Theory and Methods of Constructing of Modules System of the Perfect Modified Form of the System of Residual Classes / M. N Kasianchuk, Ya. N Nykolaychuk, I.Z. Yakymenko // Journal of Automation and Information Sciences. 2016, Vol. 48, № 8, p. 56–63.

12. Omondi A. Residue Number System: Theory and Implementation. Imperial College Press / A. Omondi, B. Premkumar. vol. 2, 2007. – 296 p.

13. Sachenko A. Data Encoding in Residue Number System / A. Sachenko, V. Yatskiv, R. Krepych, A. Karachka // Proceeding of the International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: IDAACS'2009, 2009, p. 679–681.

14. Zhengbing Hu. Increasing the Data Transmission Robustness in WSN Using the Modified Error Correction Codes on Residue Number System / Hu Zhengbing. V. Yatskiv, A. Sachenko // Elektronika ir Elektrotechnika. Vol 21, No 1, 2015, p. 76–81.

15. Karpiński M. Advanced method of factorization of multi-bit numbers based on Fermat's theorem in the system of residual classes / M. Karpiński, S. Ivasiev, I. Yakymenko, M. Kasianchuk, T. Gancarczyk // Proc. of 16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS–2016), Gyeongju, Korea, V. 1, October, 2016, p. 1484–1486.

16. Вербіцький О.В. Вступ до криптології / О.В. Вербінський – Львів : ВНТЛ, 1998. – 248 с.

17. Dasgupta S. Algorithms / S. Dasgupta, C. Papadimitriou, U. Vazirani // McGraw-Hill Science, Engineering, Math; 1 edition, 13 September, 2006, 336 p.

References

1. Ma Q. An integrated framework for information security management / Q. Ma, B. M. Schmidt, J. M. Pearson // Review of Business. Retrieved – 26 October 2013. – P. 58–69.

2. Stallings W. Cryptography and Network Security: Principles and Practice. 5th Prentice Hall Press Upper Saddle River, NJ, USA. 2010. – 719 p.

3. Nykolaychuk Ya.M. Vector-modular method of multiplying multi-digit numbers in the basis of Rademacher-Krestenson / Ya.M. Nykolaychuk, M.M. Kasyanchuk, I.Z. Yakymenko, S.V. Ivas'ev // Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic" "Computer Systems and Networks". – No. 694. – 2014. – P. 118–125.

4. Kozaczko D. Vector Module Exponential in the Remaining Classes System / D. Kozaczko, M. Kasianchuk, I. Yakymenko, S. Ivasiev / Proceedings of the 2015 IEEE 8th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS–2015), Warsaw, Poland, V.1, September – 2015, p. 161–163.

5. Kasyanchuk M.M. Foundations for the Analytical Computation of Coefficients of Basic Numbers of Krestenson's Transformation / M.M. Kasyanchuk, Ya. M. Nykolaychuk, I. Z. Yakymenko_/ Cybernetics and Systems Analysis. – September, 2014. – Volume 50, Issue 5. – pp. 649–654.

6. Hankerson D. Guide to Elliptic Curve Cryptography / D. Hankerson, A. Menezes, V. Scott / Springer-Verlag New York, USA, 2004, 311 p.

7. Koblitz N. Another look at non-standard discrete log and Diffie-Hellman problems / N. Koblitz, A. Menezes // Cryptology ePrint Archive. Report 2007/442, 2007. URL: http://eprint.iacr.org/.

8. Yakymenko I.Z. Theory of algorithms of RSA and El Gamal in a delimited Rademacher-Krestenson system / I.Z. Yakymenko, M.M. Kasyanchuk, O.I. Volynsky, I.P. Pitukh // Herald of Khmelnytsky National University. Technical sciences. - №3. - 2011. – pp. 265-273.

9. Kasyanchuk M.M. Modified method of encryption of Rabin using various forms of the system of residual classes / M.M. Kasyanchuk, I.Z. Yakymenko, L.O. Dubchak, N.A. Rendzianyak, N.M. Mandebur / Herald of Khmelnytsky National University. Technical sciences. - No. 1 (245). - 2017. – p. 127-131.

10. Kasianchuk M. N. Theoretical Foundations of the Modified Perfect form of Residue Number System / M. N. Kasianchuk, Ya. N. Nykolaychuk, I.Z. Yakymenko / Cybernetics and Systems Analysis, 2014, p. 219-223.

11. Kasianchuk M. N. Theory and Methods of Constructing of Modules System of the Perfect Modified Form of the System of Residual Classes / M. N Kasianchuk, Ya. N Nykolaychuk, I.Z. Yakymenko // Journal of Automation and Information Sciences. 2016, Vol. 48, № 8, p. 56–63.

12. Omondi A. Residue Number System: Theory and Implementation. Imperial College Press / A. Omondi, B. Premkumar. vol. 2, 2007. – 296 p.

13. Sachenko A. Data Encoding in Residue Number System / A. Sachenko, V. Yatskiv, R. Krepych, A. Karachka // Proceeding of the International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: IDAACS'2009, 2009, p. 679–681.

14. Zhengbing Hu. Increasing the Data Transmission Robustness in WSN Using the Modified Error Correction Codes on Residue Number System / Hu Zhengbing. V. Yatskiv, A. Sachenko // Elektronika ir Elektrotechnika. Vol 21, No 1, 2015, p. 76–81.

15. Karpiński M. Advanced method of factorization of multi-bit numbers based on Fermat's theorem in the system of residual classes / M. Karpiński, S. Ivasiev, I. Yakymenko, M. Kasianchuk, T. Gancarczyk // Proc. of 16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS–2016), Gyeongju, Korea, V. 1, October, 2016, p. 1484–1486.

16. Verbitskyi O. V. Introduction to cryptology. – Lviv, 1998. – 248 s.

17. Dasgupta S. Algorithms / S. Dasgupta, C. Papadimitriou, U. Vazirani // McGraw-Hill Science, Engineering, Math; 1 edition, 13 September, 2006, 336 p.

Рецензія/Peer review : 06.11.2017 р. Надрукована/Printed :19.11.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Березький О.М.

УДК 004:932.2:616-006.06

О.М. БЕРЕЗЬКИЙ, К.М. БЕРЕЗЬКА, Г.М. МЕЛЬНИК, Т.М. ДОЛИНЮК
Тернопільський національний економічний університет

СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ КОЕФІЦІЄНТА СТРУКТУРНОЇ АТИПІЇ ПАТОЛОГІЧНИХ СТАНІВ МОЛОЧНОЇ ЗАЛОЗИ

Для діагностики раку використовуються гістологічні зображення. Ці зображення відображають ділянки людських тканин. Хід злоякісних процесів характеризується зміною структури тканин. Для аналізу структурних властивостей тканин та оцінки структурних залежностей між мікрооб'єктами використовується коефіцієнт структурної атипії. Запропоновано алгоритм статистичної обробки гістологічних зображень. Проведено статистичний аналіз коефіцієнта структурної атипії (S) на основі гістологічних зображень молочної залози. Досліджено закон розподілу S, ідентифіковано різні типи патології молочної залози на основі кількісної оцінки S. Алгоритм був реалізований в гібридній інтелектуальній системі аналізу біомедичних зображень.

Ключові слова: гістологічне зображення, атипія, патологія, варіаційний ряд, статистичний розподіл.

OLEH BEREZSKY, KATERYNA BEREZKA, GRIGORIY MELNYK, TARAS DOLYNUK
Ternopil National Economic University

STATISTICAL ANALYSIS OF STRUCTURAL ATYPIA FACTOR OF BREAST PATHOLOGICAL CONDITIONS

For the diagnosis of cancer histological images are used. These images reflect sections of human tissues. The course of malignant processes is characterized by a change in the structure of tissues. To analyze the structural properties of tissues and to evaluate the structural dependencies between microobjects, the structural atypia factor is used. The algorithm of statistical processing of histological images is proposed. The statistical analysis of the structural atypia factor (S) based on the histological images of the mammary gland was performed. The distribution law of S was investigated, various types of breast pathology were identified on the basis of quantitative evaluation of S. The algorithm was implemented in the hybrid biomedical images analysis intelligence system.

Keywords: histology, mammary gland, structural atypia factor, statistical analysis.

Вступ

Для діагностування ракових захворювань використовуються зображення зрізів зафіксованих тканин людини – гістологічні зображення (ГЗ). Протікання злоякісних процесів характеризується зміною структури тканин. ГЗ належать до класу структурних текстур, тобто складаються з обмеженої кількості непохідних елементів-клітин, що знаходяться у відношенні просторового порядку – мають структурні залежності. Отже, аналіз структурних властивостей ГЗ складається із операцій виділення непохідних елементів – мікрооб'єктів та оцінки структурних залежностей між ними. Для виділення мікрооб'єктів проводиться сегментація зображення.

Для тестування розроблених алгоритмів сегментації в мережі доступні набори сегментованих анотованих зображень, наприклад The Berkeley Segmentation Dataset and Benchmark. Проте вони не містять гістологічних зображень. Існуючі ж бази біомедичних зображень, наприклад Breast Cancer Dataset, визначають тільки клас зображень і не містять анотацій і ручної сегментації. Велику тестову вибірку зображень та її ручну експертну сегментацію можна отримати тільки в рамках співпраці із медичними навчальними закладами та установами. Крім того, якщо зображень тканин при хворобах можна вибрати достатню для експериментів кількість, то анотовані зображення здорових тканин містяться тільки у підручниках та інших навчальних матеріалах.

Аналіз ГЗ – тема, що досліджується протягом багатьох років. Оглядові роботи [1, 2] підсумовують як розроблені алгоритми і методи всіх етапів аналізу ГЗ так і структурі і функції комп'ютерних систем аналізу. Із зростанням доступності обчислювальних ресурсів для аналізу ГЗ почали використовуватись штучні нейронні мережі [3]. Автори використали методи глибинного навчання ШНМ для класифікації тканин молочної залози. При застосуванні експертних систем в медичній діагностиці критичним є пояснення системою зроблених висновків

Розглянемо структуру тканин ГЗ. Молочна залоза складається з дольок, розділених прошарками сполучної тканини. Долька складається з протоки, що утворює численні трубчасті розгалуження, що закінчуються кінцевими відділами альвеолами. Схематично дані об'єкти представляються групою клітин, розташованих у вигляді колоподібних структур (рис. 1).

Ацинуси (кінцеві галуження протоків), епітелій, міоепітелій та стінки проток складаються із впорядковано розміщених клітин.

При злоякісному процесі проходить зміна структури тканин. Однією з тих змін є атипія – це порушення розташування клітин, характерного для нормального стану клітин [4]. Ракові клітини розташовуються хаотично. Для визначення ступеня атипії тканин введено коефіцієнт структурної атипії [5, 6]. Він характеризує рівень відхилення розташування клітин від нормального стану. Від того наскільки порушене розташування клітин залежить діагноз хворого. Цей показник ступеня атипії введено завдяки припущенню, що структуру тканини в нормальному стані можна описати з допомогою плоских кристалографічних груп [6], а структуру патологічних тканин за допомогою плоских кристалографічних груп зі спотвореннями.

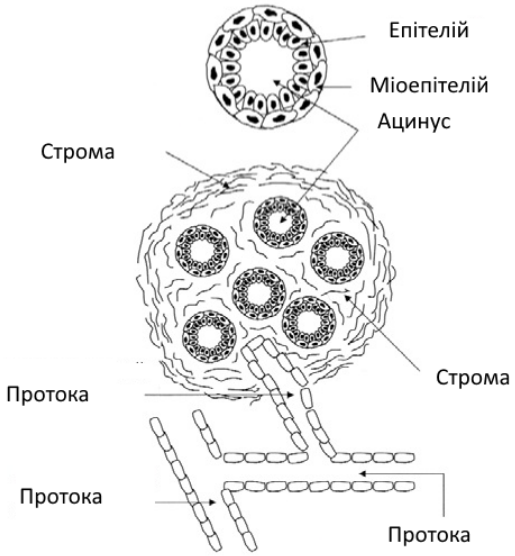


Рис. 1. Будова дольок молочної залози на гістологічному зображенні

Отже, проведений аналіз показав, що існує проблема дослідження нових ознак мікрооб'єктів та їх структурних залежностей котрі відображають процеси в тканинах.

Постановка задачі

Нехай дано п'ять груп гістологічних зображень пацієнтів $A=\{x_i\}$, $B=\{y_i\}$, $C=\{z_i\}$, $D=\{u_i\}$, $E=\{w_i\}$, $i=\overline{1,n}$, де A – непроліферативна мастопатія, B – проліферативна мастопатія, C – фіброкістозна мастопатія, D – фіброаденома, E – листовидна фіброаденома. У кожній групі для кожної клітини обчислено коефіцієнт структурної атипії.

На основі цього показника необхідно провести статистичний аналіз S (побудувати варіаційний ряд, гістограму, статистичний розподіл, обчислити середнє вибіркове, середнє квадратичне відхилення, моду M_o, емпіричну функцію розподілу $F^*(x)$, медіану m_e, розмах варіації R, коефіцієнт варіації Cv), визначити належність емпіричного розподілу певному розподілу (нормальному, показниковому, біноміальному і т.д.). Використовуючи коефіцієнт структурної атипії при постановці діагнозу необхідно дослідити залежність коефіцієнта структурної атипії від типу патології.

Коефіцієнт структурної атипії

Існують такі геометричні породжуючі перетворення паралельний перенос, центральна симетрія, осьова симетрія, ковзне відображення, поворот, їх комбінації [4]. Кожне геометричне перетворення в афінному просторі задається в матричному вигляді так: $T=\begin{pmatrix} a & b & 0 \\ c & d & 0 \\ m & n & 1 \end{pmatrix}$, де a, b, c і d здійснюють відповідно зсув, поворот, відображення, локальне масштабування; m і n виконують зміщення. Нехай множина геометричних породжуючих перетворень $S=\{T_1,T_2,...,T_n\}$ відповідає аксіомам абстрактної групи.

Величина абсолютної похибки Δ для перетворень T_1, …, T_{n-1}, T_n, враховуючи похибки від коефіцієнтів a, b, c, d, m, n рівна:

$$\Delta=\sum_{j=1}^{3}\sum_{i=1}^{3}\left|t_{ij}^{*}-t_{ij}\right|,$$

де t_{ij} – точне значення коефіцієнта матриці еталонного перетворення T^e;

t_{ij}^{*} –значення коефіцієнта матриці реального перетворення T.

Обчислене значення похибки (спотворення) справедливе тільки для одного рапорту. В загальному випадку зображення складається із n рапортів і тоді коефіцієнт структурної атипії (загальна похибка спотворення) рівний:

$$S=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left|\Delta_i\right|}{n}.$$

де n – кількість рапортів на зображенні.

Алгоритм статистичної обробки гістологічних зображень

Опишемо розроблений алгоритм статистичної обробки гістологічних зображень.

Алгоритм складається з таких кроків [7]:

1. Будуємо варіаційний ряд і статистичний розподіл вибірки гістологічного дослідження. Оскільки коефіцієнт структурної атипії – неперервна випадкова величина, тоді статистичний розподіл вибірки задаємо інтервальним розподілом:

$[x_i, x_{i+1})$	$[x_1, x_2)$	$[x_2, x_3)$	…	$[x_k, x_{k+1})$
n_i	n_1	n_2	…	n_k

2. Візуалізуємо досліджуваний процес за допомогою гістограми та полігону частот, і кумуляти при нарощуванні частот або збільшенні величини ознаки.

3. Обчислюємо такі числові характеристики вибірки: середню арифметичну $\bar{x}_в$, моду за формулою $M_o = x_m + \frac{n_m - n_{m-1}}{2n_m - n_{m-1} - n_{m+1}} h_m$, де $[x_m, x_{m+1})$ – модальний інтервал, n_m – число варіант з цього інтервалу. Знаходимо значення емпіричної функції розподілу $F^*(x) = W(X < x) = {n_x}/{n}$, де n_x – сума частот тих варіант, які менші від x, n – обсяг вибірки. Знаходимо медіану за формулою $M_e = x_m + \frac{0{,}5 - F^*(x_m)}{F^*(x_{m+1}) - F^*(x_m)}(x_{m+1} - x_m)$, де $[x_m, x_{m+1})$ – медіанний частинний інтервал $(1 \le m \le k)$, для якого виконуються нерівності $F^*(x_m) < 0{,}5$, $F^*(x_{m+1}) > 0{,}5$. Знаходимо квартилі – значення варіант, що ділять варіаційний ряд разом з медіаною на 4 частини.

4. Обчислюємо числові характеристики вибірки для оцінювання ступеня розсіювання: розмах варіації, дисперсію $\sigma_в^2$, середнє квадратичне відхилення $\sigma_в$, коефіцієнт варіації $CV = \frac{\sigma_в}{\bar{x}_в} \cdot 100\%$.

5. Обчислюємо помилки репрезентативності вибірки за формулою $m = \pm\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ і робимо висновки за розміром помилки, наскільки середня величина вибіркової сукупності відрізняється від середньої генеральної сукупності.

З таблиці значень функції Лапласа вибираємо довірчий коефіцієнт t для заданого ступеня надійності p з рівності $2\Phi(t) = p$.

Знаходимо межі середньої арифметичної генеральної: $M_{ген} = \bar{x} \pm tm$.

7. Робимо перевірку приналежності вибіркових даних нормальному розподілу із визначеними параметрами за критерієм узгодженості Пірсона (χ^2):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{m} \frac{(n_i - n_i^0)^2}{n_i^0},$$

де n_i – частота варіанти x_i, $n_i^0 = np_i$ – теоретична частота варіанти x_i, n – обсяг вибірки, p_i – імовірність варіанти x_i, яка обчислюється за формулою:

$$p_i = \Phi\left(\frac{x_{i+1} - \bar{x}}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}\right),$$

де $\Phi(x)$ – функція Лапласа.

Робимо висновки стосовно узагальнених показників значень варіантів морфометричних ознак, їх варіабельності, розподілу, меж середньої арифметичної генеральної.

Досліджуємо незміщеність, спроможність і ефективність коефіцієнта структурної атипії.

Наведемо визначення незміщеності, спроможності і ефективності.

Визначення 1. Незміщеною називають статистичну оцінку Q^*, математичне сподівання якої дорівнює оцінюваному параметру Q за будь-якого обсягу вибірки, тобто $M(Q^*)=Q$.

Зміщеною називають оцінку, математичне сподівання якої не дорівнює оцінюваному параметру.

Визначення 2. Ефективною називають статистичну оцінку, яка за заданого обсягу вибірки n має найменшу можливу дисперсію.

При розгляді вибірок великого обсягу (n велике) до статистичних оцінок ставиться вимога спроможності.

Визначення 3. Спроможною називають статистичну оцінку, яка при $n \to \infty$ прямує за ймовірністю до оцінюваного параметру. Наприклад, якщо дисперсія незміщеної оцінки при $n \to \infty$ прямує до нуля, то така оцінка виявляється і спроможною [8].

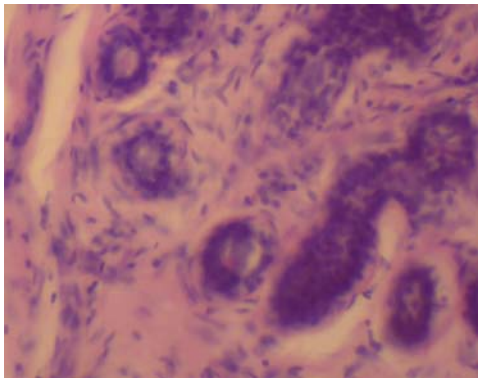
Результати експериментальних досліджень

В рамках держбюджетної теми «Гібридна інтелектуальна інформаційна технологія діагностування передракових станів молочної залози на основі аналізу зображень» нами було проведено експериментальне дослідження коефіцієнта структурної атипії, для чого використано 500 ГЗ тканин епітеліального шару по

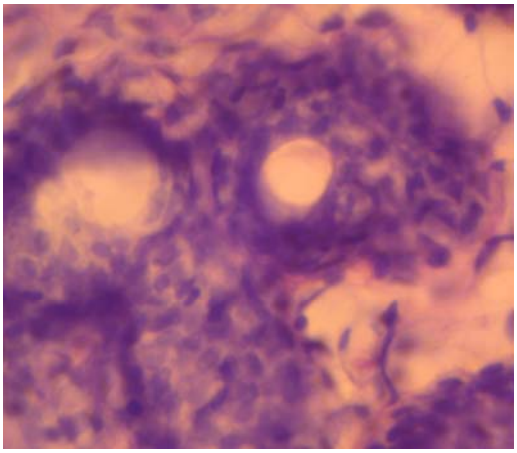
100 зразків для класів непроліферативної, проліферативної та фіброкістозної мастопатії, фіброаденоми та листовидної фіброаденоми. Кожен клас відображає певний діагноз [11].

Для морфометричного аналізу застосовані цитологічні препарати, які виготовлені за методикою Романовського. Аналіз препаратів здійснено за допомогою гібридній інтелектуальній системі аналізу біомедичних зображень на базі комп'ютера з процесором Intel Pentium 3,2 ГГц та цифрової відеокамери 6 Мпікс.

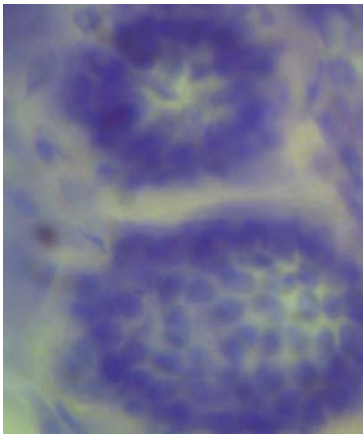
Проведено гістологічне дослідження молочної залози при різних ступенях мастопатії, зображення яких показано на рис. 2.



Непроліферативна мастопатія



Проліферативна мастопатія



Фіброаденома

Рис. 2. Зображення різних типів мастопатії

Результати експериментальних досліджень наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Основні статистичні показники

Статистичний показник	Непроліферативна мастопатія	Проліферативна мастопатія	Фіброкістозна мастопатія	Фіброаденома	Листовидна фіброаденома
Медіана	0,8551	0,9016	0,87	0,9136	0,9324
Мода	0,9206	0,947	0,7901	0,8276	0,9229
Вибіркова середня	0,8252	0,8640	0,8779	0,9213	0,9289
Середнє квадратичне відхилення	0,3007	0,3249	0,3257	0,257	0,3416
Помилка середнього квадратичного відхилення	0,0301	0,0325	0,0326	0,0257	0,0342
Розмах варіації	1,4733	1,6049	1,4860	1,3346	1,7089
Максимальне значення	1,5852	1,6253	1,6027	1,5476	1,8708
Мінімальне значення	0,1119	0,0204	0,1167	0,2130	0,1619
Коефіцієнт варіації	0,3645	0,376	0,371	0,279	0,3678
Асиметрія	-0,0519	-0,237	0,0907	-0,1666	0,1462
Ексцес	-0,169	-0,162	-0,476	0,155	0,071

Досліджено залежність коефіцієнта структурної атипії *S* від типу патології молочної залози (рис. 3).

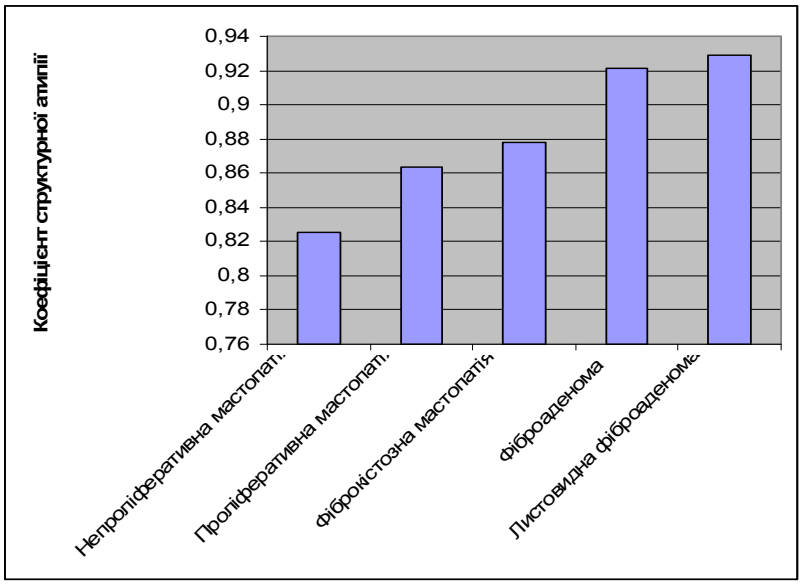


Рис. 3. Графік залежності коефіцієнта структурної атипії *S* від типу патології молочної залози

Незміщеність оцінки коефіцієнта структурної атипії характеризувалася відносною і абсолютною похибкою, ефективність цієї оцінки визначалася за допомогою середньоквадратичного відхилення. Спроможність оцінки забезпечувалась шляхом зміни розміру вибірки при обчисленні числових характеристик коефіцієнта структурної атипії. Значення розміру вибірки вибирались від 5 до 100 коефіцієнтів структурної атипії з кроком 5.

Відносна і абсолютна похибки обчислювалися відповідно за формулами:

$$\Delta a^* = a - a^*,$$

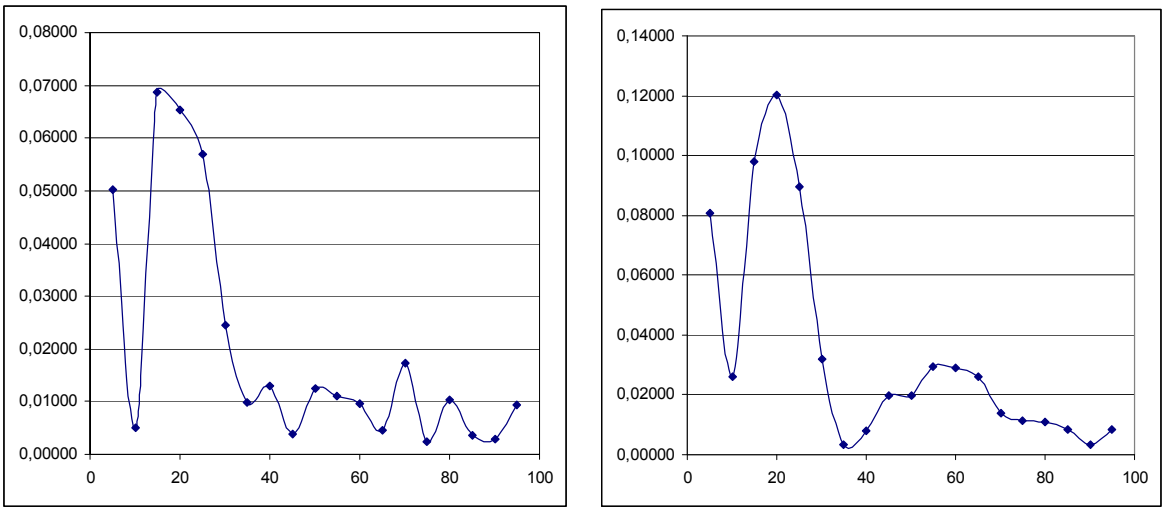
$$\delta(a^*) = \frac{\Delta a^*}{|a|},$$

де a – точне значення, a^* – наближене значення деякої величини. За точне значення коефіцієнта структурної атипії було вибрано вибіркову середню, за наближені значення – вибіркові середні, що обчислювалися для цього коефіцієнта з кроком 5.

Графік залежності абсолютної похибки від величини вибірки для непроліферативної та фіброкістозної мастопатії наведено на рис. 4.

Висновки

Статистичний аналіз показав, що закон розподілу коефіцієнта структурної атипії є нормальний і дав змогу провести ідентифікацію різних ступенів мастопатії на основі кількісної оцінки *S*. Проведене дослідження дає можливість здійснювати класифікацію патологічних станів молочної залози на основі ознак зміни структури гістологічного зображення.



а) **б)**

Рис. 4. Залежність абсолютної похибки від величини вибірки:
а) непроліферативна, б) фіброкістозна мастопатія

Література

1. Егорова О. В. Компьютерная микроскопия / О. В. Егорова, Е. И. Клыкова, В. Г. Пантелеев. – М. : Техносфера, 2005. – 304 с.

2. M.N. Gurcan Histopathological Image Analysis: A Review / M.N. Gurcan, L. Boucheron, A. Can, A. Madabhushi, N. Rajpoot, B. Yener // IEEE reviews in biomedical engineering. – 2009. – Vol. 2. – P. 147–171.

3. Classification of breast cancer histology images using Convolutional Neural Networks / T. Araujo, G. Aresta, E. Castro, J. Rouco, P. Aguiar, C. Eloy // PLoS ONE. – 2017. – Vol. 12(6).

3.1. 4.Ошибки в клинической онкологии / под ред. В.И. Чиссова, А.Х. Трахтенберга. – М. : ГЭОТАР-Медиа, 2009. – 768 с.

4. Березький О. М. Статистична оцінка коефіцієнта структурної атипії на основі аналізу гістологічних зображень / О. М. Березький // Збірник наукових праць інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. – 2013. – Вип. 67. – С. 113–121.

5. Мельник Г.М. Інформаційна технологія аналізу структурних текстур для опрацювання зображень ауто- та ксеногенних тканин / Г.М. Мельник // Вісник Хмельницького національного університету. – 2014. – № 6(219). – С. 73–79.

6. Березький О. М. Методи і алгоритми аналізу та синтезу асиметричних зображень / О. М. Березький // Искусственный интеллект. – 2010. – № 4. – С. 162–172.

7. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / Гмурман В.Е. – М. : Высшая школа, 1972. – 368 с.

8. Березький О. М. Статистичне оброблення цитологічних зображень / О. М. Березький, К.М. Березька, С. Ю. Попіна // Вісник Хмельницького національного університету. – 2012. – № 5. – С. 161–164.

9. Березький О. М. Нечітка база знань інтелектуальної системи діагностування видів раку молочної залози / О. М. Березький, Г.М. Мельник, К. М. Березька // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2013. – № 6. – С. 284–292.

10. Розроблення реляційної бази даних інтелектуальної системи автоматизованої мікроскопії / О.М. Березький, О.Й. Піцун, С.О. Вербовий, Т.В. Дацко // Науковий вісник національного лісотехнічного університету України : збірник науково-технічних праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2017. – Т. 27, № 5. – С. 125–129

References

1. Egorova O. V. Computer microscopy / O. V. Egorova, E. I. Klykova, V. G. Panteleev - Moscow: Technosphere, 2005. - 304 p.

2. Histopathological Image Analysis: A Review / M.N. Gurcan, L. Boucheron, A. Can, A .Madabhushi, N. Rajpoot, B. Yener. // IEEE reviews in biomedical engineering. – 2009. – Vol. 2. – P. 147-171.

3. Classification of breast cancer histology images using Convolutional Neural Networks / T. Araujo, G. Aresta, E. Castro, J. Rouco, P. Aguiar, C. Eloy, // PLoS ONE. – 2017. – Vol. 12(6)

4. Errors in clinical oncology // ed. V.I. Chissova, A.H. Trachtenberg. - M.: GEOTAR-MEDIA, 2009. - 768 p.

5. Berezsky O. M. Statistical estimation of the coefficient of structural atypia on the basis of analysis of histological images / O. M. Berezky // Collection of scientific works of the Institute of Modeling Problems in Power Engineering them. G. E. Puhov NAS of Ukraine. - 2013. - Issue 67. - P. 113-121.

6. Melnyk G.M. Information technology for the analysis of structural textures for the processing of images of autogenous and xenogenous tissues / G.M. Melnyk // Bulletin of the Khmelnitsky National University. - 2014 - No. 6 (219). - P. 73-79.

7. Berezsky O. M. Methods and algorithms for analysis and synthesis of asymmetric images / O. M. Berezsky // Artificial Intelligence. - 2010. - No. 4. - P. 162-172.

8. Gmurman V.E. Probability theory and mathematical statistics. - M .: Higher school, 1972. - 368 p.

9. Berezsky O. M. Statistical processing of cytological images / O. M. Berezsky, K. M. Berezka, S. Yu. Popina // Bulletin of the Khmelnitsky National University. - 2012. - No. 5. - P. 161-164.

10. Berezsky O. M. Fuzzy knowledge base of the intelligent system for diagnosing breast cancer types / O. M. Berezsky, G. M. Melnyk, K. M. Berezka // Bulletin of the Khmelnitsky National University. Technical sciences. - 2013. - № 6. - P. 284-292.

11. Relational database of intelligent automated microscopy system / O.M. Berezky, O.Yo. Pitsun, S.O. Verbovyi, T.V. Datsko // Scientific Bulletin of Ukrainian National Forestry Universitys. - Lviv: UNFU. - 2017. - Vol. 27, No. 5. - P.125-129.

Рецензія/Peer review : 06.10.2017 р. Надрукована/Printed :01.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., доц. Яцків В.В.

УДК 636.082.22:639.3

Н.В. ТІТОВА, С.В. КОСТІШИН, М.В. МОСКОВКО
Вінницький національний технічний університет

АЛГОРИТМІЧНО-ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ УПРАВЛІННЯ ІНКУБАЦІЙНИМ ПРОЦЕСОМ ОСЕТРОВИХ

В роботі розглядається алгоритмічно-програмне забезпечення управління низько енергетичною світлодіодною технологією впливу на ікру осетрових і білого амура. Особливістю інкубаційного процесу являється алгоритм контролю, керування ним, реалізоване на базі мікроконтролера. Налаштування системи полягають у виборі кількості елементів, які поєднані в єдину установку за рахунок підключення апаратних засобів. Наведено вимоги, що забезпечують технологічну гнучкість процесу, вирощування ікри та універсальність роботи всієї установки.

Ключові слова: світлодіодна технологія, програмне забезпечення, процес вирощування, риб, світлодіоди.

N.V. TITOVA, S.V. KOSTYSHIN, M.V. MOSKOVKO
Vinnytsia National Technical University

ALGORITHMIC SOFTWARE OF MANAGEMENT TECHNOLOGY OF INCUBATION PROCESS OF ASTROTIC

The paper considers the algorithmic and programmatic control of the low-energy LED technology for influencing sturgeon and white currant caviar. The feature of the incubation process is the control algorithm and its control, implemented on the basis of the microcontroller. System setup is to select the number of items that are combined into a single installation by connecting the hardware. Requirements providing technological flexibility of process, cultivation of caviar and versatility of work of the whole installation are given. The developed control algorithm provides for direct control and measurement of the quantitative values of such indicators of the incubation process; PH meter, transparency and water level in the Weiss apparatus, its temperature, incubation temperature, day or night brightness level, the composition of the color spectrum of photon radiation and the level of oxygen in each Weiss apparatus. The algorithm of the system's operation is as follows: when the power is turned on, the control interface block executes the diagnostics of the connected flasks. Having formed the list of flask addresses, the system awaits the user, which is to choose an installation item a specific flask, or else the flasks together. After identifying the control object, the mode selection is selected - diagnosis or regulation. The diagnostics includes a display of control information, namely, a widget on the screen about the current level of illumination including color gamut and brightness of the luminescence, the water in the flask and the operating time of the installation. Regular inclusion of the control actions of the counts means the parameters of the physical factors that affect the flask from the system side. These factors include lighting, temperature, circulation velocity. Also, the regulation allows you to raise the screen to access the bulb and carry out maintenance work. Thus, when adjusting it is necessary to select the channel of influence, to set necessary values and confirm your choice. After that, the corresponding control signal will be transmitted at the selected address to the working body of the flask, as well as in the go to the main menu. It should be noted that when choosing all the elements flasks of the installation at once, only a parameter adjustment option is available that ensures that all flasks are assigned the same value. The values of the control parameters for the bulb 4 are stored in the non-volatile memory of the system and are maintained during operation or during power recovery. These parameters remain unchanged until the user enters other values. The user navigates through the menu and selects the values of the parameters using the matrix keyboard and cursor. In a calm state, the system permanently receives data on the current water temperature.

Key words: LED technology, software, growing process, fish, LEDs.

Вступ

Відмінністю розробленої низько енергетичної світлодіодної технології впливу на ікру осетрових і білого амура є те, що вона містить в собі основні етапи риборозплідних технологій, які представлені діагностичною (оціночною) складовою і керуючою, яка забезпечує формування і подачу необхідних впливів і режимів на ікру осетрових і білого амура в інкубаційному періоді. При цьому, враховано і те, що фактично низько енергетична світлодіодна технологія відноситься до біотехнічних інформаційних технологій, оскільки має біологічний компонент – ікру гідробіонтів і технічний – апаратно-програмні засоби забезпечення інкубаційного процесу, які в сукупності з інформаційними атрибутами технології (підсистема підтримки прийняття рішень, бази даних і знань, моделі і алгоритми) дозволяють говорити про створення нового класу риборозплідних технологій – інтелектуальні світлодіодні технології низько енергетичного забезпечення інкубаційних процесів (ІСТ НЗІП). В даному випадку під словом «забезпечення» розуміють процедури та інші дії, пов’язані з інкубаційним процесом ікри риб [2, 6].

Стан проблеми

Особливістю інкубаційного процесу являється алгоритм контролю у керування ним, реалізований на базі мікроконтролера сімейства ATMEGA [1]. Розроблений алгоритм керування у сукупності з структурою етапу передбачає регулювання температури води: 1) одночасно у всіх 5-и апаратах Вейса, що входять до складу інкубаційної установки; 2) в будь-якому із п’яти апаратів Вейса автономно від інших [3]; 3) розрахунок завантаження ікри з урахуванням її товарно-живого виду; 4) розрахунок і забезпечення кисневого балансу одночасно для всіх і для кожного з п'яти апаратів Вейса; 5) установку та автоматичну підтримку температури інкубаційного процесу; 6) установку і автоматичне супроводження любої комбінації чорно-білого режиму освітленості в апаратах Вейса; 7) розрахунок, установку і автоматичне супроводження любого складу кольорової RGB-гами режиму колірності в апаратах Вейса; 8) постійну підтримку свіжої води апаратів Вейса [4, 5].

Основний текст статті

Первинні налаштування системи полягають у виборі кількості елементів, «які» поєднані в єдину

установку за рахунок підключення апаратних засобів, які були обґрунтовані вище.

В ході розробки алгоритму роботи враховано наступні фактори:

1. Установка представлена багатоколбовою конструкцією.

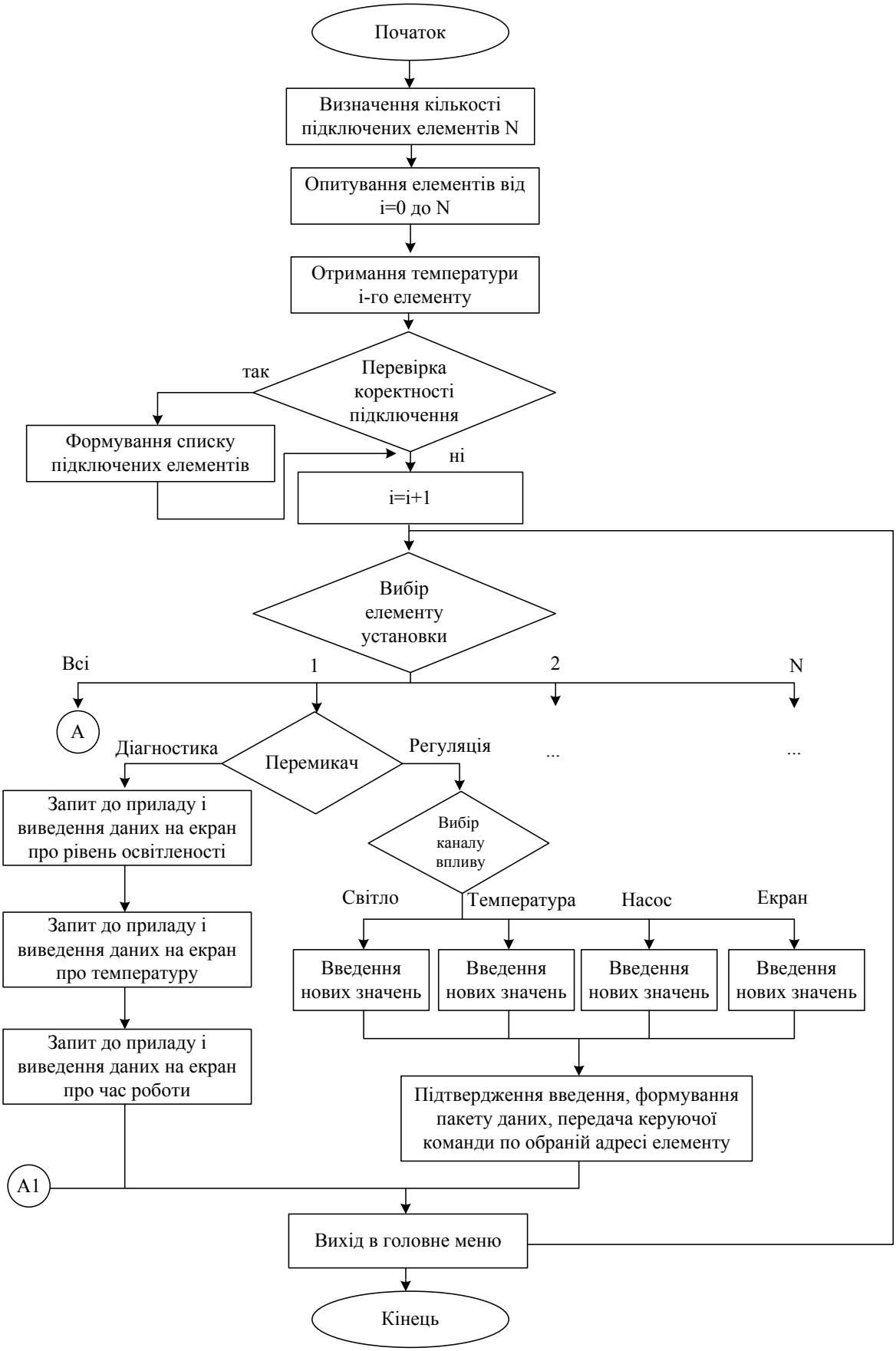


Рис. 1. Блок-схема загального алгоритму роботи системи

2. Кожна колба має власний канал керування апаратними засобами обслуговування та індивідуальне налаштування керуючих впливів.

3. Сформовано спосіб передачі однакового керуючого сигналу одразу для всіх колб установки.

4. Зчитування поточних даних про рівень освітленості, температури та часу роботи колби, здійснюється в двох режимах: неперервному і дискретному.

Включення даних вимог забезпечує технологічну гнучкість процесу, вирощування ікри та універсальність роботи всієї установки, колби якої можуть використовуватися на різних його стадіях.

Алгоритм роботи системи полягає в наступному: при увімкненні живлення блок інтерфейсу керування виконує діагностику підключених до системи колб. Сформувавши перелік адрес колб, система очікує на дію користувача, яка полягає у виборі елементу установки (конкретної колби), або всіх колб разом.

Після ідентифікації об’єкту керування здійснюється вибір режиму – діагностика або регуляція. Діагностика включає в себе збір інформації про об'єкт керування, а саме, виводить на екран дані про поточний рівень освітленості (включаючи кольорову гаму та яскравість світіння), температуру води в колбі та час роботи установки. Регулювання включає в себе керуючі дії щодо присвоєння значень параметрів фізичних факторів, які впливають на колбу зі сторони системи. До таких факторів відноситься освітлення, температура, швидкість циркуляції води. Також, регуляція дозволяє підняти екран для отримання доступу до колби і проведення обслуговуючих робіт.

Таким чином, під час регуляції необхідно вибрати канал впливу, виставити необхідні значення та підтвердити свій вибір. Після цього відповідний керуючий сигнал буде передано за обраною адресою на робочий орган колби, а користувач вийде в головне меню.

Слід зауважити, що при виборі одразу всіх елементів (колб) установки, можливий лише варіант регулювання параметрів, який забезпечує присвоєння однакового значення всім колбам.

Значення параметрів керуючих впливів для колби 4 зберігаються в енергонезалежній пам'яті системи та витримуються протягом роботи або при відновленні живлення. Ці параметри є незмінними до тих пір, коли користувач не введе інші значення.

Навігацію по меню та вибір значення параметрів користувач здійснює за допомогою матричної клавіатури та курсору.

В спокійному стані, система перманентно отримує дані про поточну температуру води в колбах і на основі цих даних аналізує кількість кисню, що розчинений в ній. Даний аналіз проводять за алгоритмом, що представлений на рис. 1, 2. Згідно з наданим алгоритмом, центральний блок інтерфейсу системи, маючи список підключених блоків керування колбами, періодично (1 раз за хвилину) подає запит на отримання значення температури води до кожного периферійного блоку.

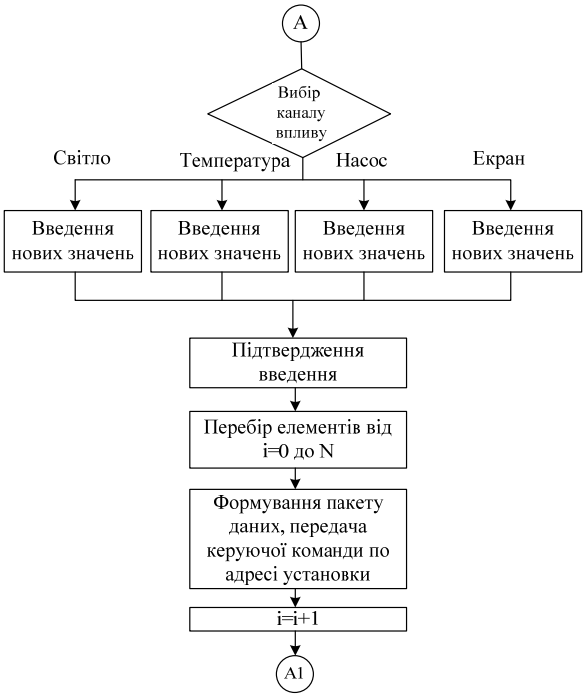


Рис. 2. Блок-схема загального алгоритму роботи системи (продовження)

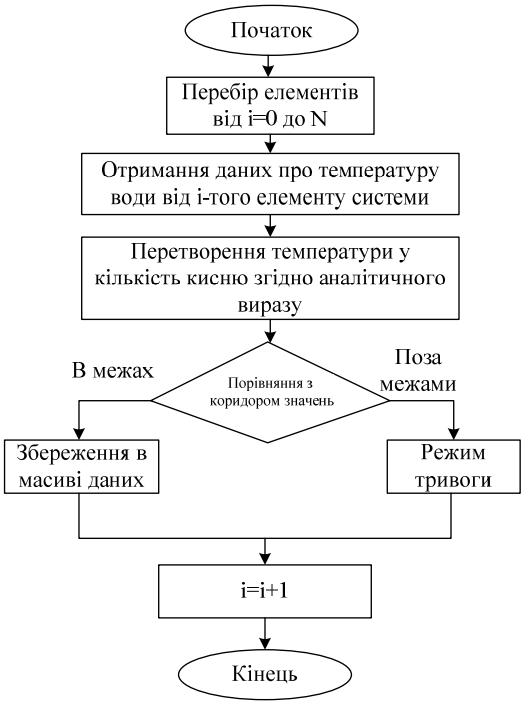


Рис. 3. Алгоритм роботи модуля визначення рівню кисню в воді

Отримавши дані, система виконує перетворення температури в кількість розчиненого кисню згідно з аналітичною залежністю (рис. 4)

$$K(O_2) = 1.3\sin(-0.058t/57.3)-0.145t +14, \quad (1)$$

де t – температура; $K(O_2)$ – розрахункова концентрація кисню у воді.

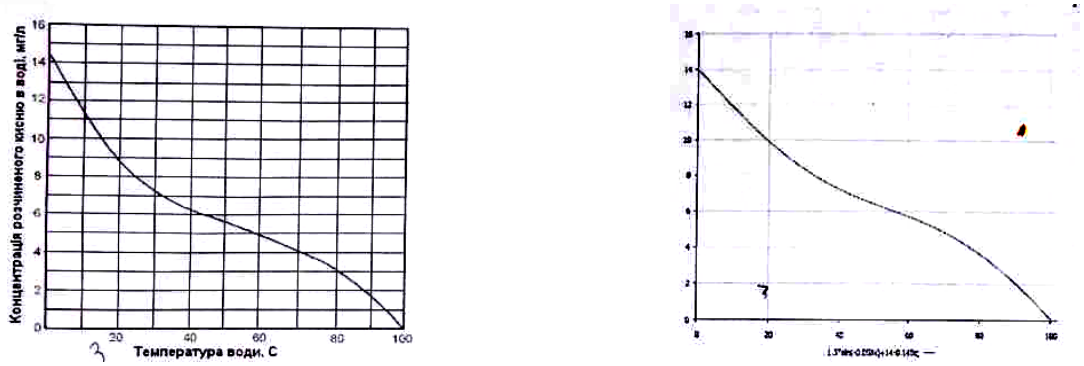


Рис. 4. Крива залежності кількості розчиненого кисню у воді залежно від її температури та її аналітичне відтворення

Отримана температура зберігається в масиві даних і доступна для скачування на персональний комп'ютер, подальшого аналітичного оброблення та побудови графіків та діаграм.

Висновки

Розроблений алгоритм контролю передбачає прямий контроль і вимірювання кількісних значень таких показників інкубаційного процесу; pH-метрію, прозорість і рівень води в апаратах Вейса, її температуру, температури інкубації, рівень яскравості в режимі «день/ніч», склад кольорової гами фотонного випромінювання і рівня кисню в кожному апараті Вейса.

Література

1. Основные характеристики микроконтролера ATmega16 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://microchipinf.com/articles/45

2. Рыбоводно-биологические показатели молоди белуги, стерляди, русского осетра и севрюги при выращивании в системе УЗВ [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://cyberleninka.ru/article/n/rybovodno-biologicheskie-pokazateli-molodi-belugi-sterlyadi-russkogo-osetra-i-severugi-pri-vyraschiva-v-sisteme

3. Злепко С. М. Методи і засоби оцінювання та керування станом організму людини при старінні : монографія / Злепко С. М., Новиков В. О. – Херсон, 2014.

4. Многоцветная светодиодная подсветка или RGB-контроллер-Labkit [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://labkit.ru/html/autocontrol?id=420

5. Управление RGB светодиодом с помощью аппаратно ШИМ Atmega 8 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://avrlab.com/node/93

6. Чебанов М. С. Руководство по искусственному воспроизводству осетровых рыб. Технический доклад ФАО по рыбному хозяйству 558 [Електронний ресурс] / М. С. Чебанов, Е. В. Галич (Краснодар) / Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН. – Анкара, 2013. – Режим доступу : http://www.fao.Org/docrep/017/I2144r/i2144r.pdf

References

1. Osnovnyie harakteristiki mikrokontrolera ATmega16 [Elektronniy resurs]. – Rezhim dostupu: http://microchipinf.com/articles/45

2. Ryibovodno-biologicheskie pokazateli molodi belugi, sterlyadi, russkogo osetra i sevryugi pri vyiraschivanii v sisteme UZV [Elektronniy resurs]. – Rezhim dostupu: http://cyberleninka.ru/article/n/rybovodno-biologicheskie-pokazateli-molodi-belugi-sterlyadi-russkogo-osetra-i-severugi-pri-vyraschiva-v-sisteme-uzv

3. Zlepko S. M., Novikov V. O. Metodi I zasobi otsInyuvannya ta keruvannya stanom organIzmu lyudini pri starInnI: MonografIya. - Herson, 2014.

4. Mnogotsvetnaya svetodiodnaya podsvetka ili RGB-kontroller-Labkit [Elektronniy resurs]. – Rezhim dostupu: http://labkit.ru/html/autocontrol?id=420

5. Upravlenie RGB svetodiodom s pomoschyu apparatno ShIM Atmega 8 – Rezhim dostupu: https://avrlab.com/node/93

6. Rukovodstvo po iskusstvennomu vosproizvodstvu osetrovih ryib. Tehnicheskiy doklad FAO po ryibnomu hozyaystvu 558 / M. S. Chebanov, E. V. Galich (Krasnodar). Prodovolstvennaya i selskohozyaystvennaya organizatsiya OON. Ankara, 2013 – http://www.fao.Org/docrep/017/I2144g/I2144r.pdf

Рецензія/Peer review : 27.11.2017 р. Надрукована/Printed :13.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Кичак В.М.

УДК 004.658.2

К.А. НОВОХАТСЬКА
Одеський національний політехнічний університет

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ АВТОМАТИЗОВАНОГО ОНОВЛЕННЯ МАТЕРІАЛІЗОВАНИХ ПРЕДСТАВЛЕНЬ ШЛЯХОМ ПОШИРЕННЯ ЇЇ НА ІЄРАХІЧНІ ТА АНАЛІТИЧНІ ЗАПИТИ

Вдосконалюється технологія автоматизованого оновлення матеріалізованих представлень. Запропоновано логічні функції оновлення для матеріалізації ієрархічних запитів та запитів з аналітичними функціями. Розроблено алгоритм перетворення логічних функцій оновлення на тригери SQL. Проведено аналіз журналу виконання трансакцій СКБД для оцінки якості удосконаленої технології генерації функцій оновлення у порівнянні з базовою технологією.

Ключові слова: матеріалізоване представлення, логічна функція оновлення, ієрархічний запит, аналітична функція.

K. NOVOKHATSKA
Odessa National Polytechnic University

TECHNOLOGY IMPROVEMENT OF THE AUTOMATED MAINTENANCE OF MATERIALIZED VIEWS BY EXTENDING IT ON HIERARCHICAL AND ANALYTICAL QUERIES

One of the effective methods for solving the problem of increasing the performance in relational databases is the use of materialized views (MV) – stored results of query execution. Applying MV for resource-intensive and often-repeated queries can significantly shorten the execution time and thereby improve overall system performance. When MV are formed, the task is to maintain the relevance of data stored in the MV. Modern technologies of automated MV maintenance only partially cover the syntax of the SQL language. In particular, such SQL constructs as hierarchical and analytical queries are not supported. This leads to the fact that in many cases the creation of MV update functions is performed manually. The technology of automated materialized views maintenance is being improved. The logical update functions are proposed for the materialization of hierarchical queries and queries with analytic functions. The algorithm for converting the logical update functions to the SQL triggers is developed. The analysis of the DBMS transaction log has been performed to evaluate the quality of the improved technology of update functions generation in comparison with the base technology. Using advanced technology, it was possible to create an average of 7% more update functions than the base technology. The developed technology extends the capabilities of the base method for the materialization of hierarchical queries and queries with analytic functions, but the error in the syntax of the created update functions for these query groups is still quite large (the proportion of logically correct update functions is 62% and 55% respectively).

Keywords: materialized view, logical update function, hierarchical query, analytic function.

Вступ

Одним з ефективних методів вирішення проблеми підвищення продуктивності реляційних баз даних (РБД) є використання матеріалізованих представлень (МП) – збережених результатів виконання запитів. Застосування МП для ресурсномістких і часто повторюваних запитів може значно скоротити час виконання і тим самим підвищити загальну продуктивність системи. Коли МП сформовані, виникає задача підтримки актуальності даних, що зберігаються в МП. Сучасні технології автоматизованого оновлення МП лише частково охоплюють синтаксис мови SQL. Зокрема, не підтримуються такі конструкції мови SQL, як ієрархічні і аналітичні запити. Це призводить до того, що в багатьох випадках створення функцій оновлення МП виконується вручну.

При ручному підході немає можливості проаналізувати всі запити, що надходять в систему, врахувати статистичні і часові показники виконання, і вибрати МП, що дозволяють максимально ефективно оптимізувати роботу конкретної інформаційної системи (ІС). Таким чином, створені вручну МП вирішують лише точкові проблеми продуктивності систем керування базами даних (СКБД). Отже підтримка усіх конструкцій мови SQL у технології автоматизації оновлення МП є актуальною проблемою.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В [1] розглядається методика генерації функцій поновлення МП для різних видів запитів, які на підставі лексичного аналізу пропонується класифікувати по шести групах. Для даних видів запитів проаналізовано ефективність використання таблиць оновлення і виведені числові коефіцієнти, що дозволяють оцінити ефективність застосування таблиць оновлення на практиці.

Перевагою запропонованої методики є універсальність форми логічного запису, яка зводить будь-який запит до набору простих операцій над атомарними значеннями. Такий підхід дозволяє автоматизувати генерацію тригерів для оновлення МП.

Запропонована класифікація запитів дозволяє поширити розглянутий метод на більшість практичних застосувань. Проте вона не покриває такі типи запитів, як запити з використанням ієрархій або аналітичних функцій.

В [2] розробляється технологія інкрементального обслуговування запитів з агрегаціями і об'єднаннями, також заснована на використанні таблиць змін (*change-table technique*). Обчислення нового значення МП виконується за допомогою застосування оператора оновлення до даних, занесених в таблицю.

Автори розробляють функції оновлення запитів, що містять агрегації і об'єднання, і розраховують

вартість оновлення з урахуванням запропонованого методу. Недоліком цього методу є його реалізація на мові логічної вибірки (*deductive query language*), що не дозволяє застосовувати його на практиці.

В [3] розглядається алгоритм для обчислення SPJ-запитів, що не підтримує реалізацію агрегацій і т.д.

В [4] розглядаються інкрементальні оновлення с використанням моноїдів, обчислюваних на основі множин модифікованих рядків базових таблиць (БТ). Оскільки потужність множини ΔC в порівнянні з потужністю множини C досить мала, то витрати на обчислення функції f для ΔC будуть значно менше, ніж перерахунок всього МП, що доводить ефективність даної технології.

Однак для моноїдів існують деякі обмеження. У більшості випадків вони можуть бути застосовані тільки до лінійних операцій, що ускладнює обслуговування МП, які містять такі функції, як *UNIQUE*, *DISTINCT* тощо. Ще одним недоліком використання моноїдів в сучасних СКБД є їх придатність тільки до атомарних типів даних [5].

В [6, 7] розробляється механізм генерації правил обслуговування МП (*view-maintaining rules*). Правила створюються для операцій вставки, видалення і модифікації рядків з основних таблиць для кожного посилання на таблицю в тексті запиту МП і спрацьовують за принципом тригера для кожної користувальницької транзакції, яка може включати в себе одну або більше операцій модифікації даних.

Для зберігання службових даних про зміни БТ автори використовують набір таблиць (*transition tables*) – по одній таблиці для операцій *INSERT* і *DELETE* і по дві таблиці для *UPDATE* (для старого і нового значення полів). Усередині правила може бути виконана операція *SELECT* для того, щоб при необхідності отримати оновлене значення рядків БТ.

Для генерації правил автори розробили граматику, що описує деякі основні конструкції мови SQL. Граматика дозволяє створювати правила для підзапитів з використанням ключових слів *ANY*, *IN* і *EXISTS*, а також операцій заперечення (*NOT*) і порівняння (>, < і т.д.). Однак нею не підтримуються агрегації і інші поширені функції, що обмежує використання запропонованої технології. Крім того, автори вводять обмеження на обслуговування представлень, що містять в собі дублікати. В такому випадку, результат спрацьовування правил може бути непередбачуваним.

Крім описаних джерел інкрементальні поновлення різних видів запитів також розглядаються в роботах [8–10], однак, запропоновані рішення перетинаються з вже розглянутими технологіями.

Мета та задачі дослідження

Метою даної роботи є підвищення якості технології автоматизованого поновлення МП шляхом поширення даної технології на ієрархічні і аналітичні типи запитів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- запропонувати логічні функції оновлення для ієрархічних і аналітичних запитів;
- розробити алгоритм перетворення логічних функцій оновлення на тригери мови SQL.

Матеріали та методи дослідження автоматизованого оновлення МП

Розглянемо деяке МП M, що містить поля m_i, $i=\overline{1,n}$. Представимо запит, що формує це МП, як функцію трьох змінних:

$$f(\pi,T,P) \text{ чи } f(f_{вн}(\pi),T,P), \quad (1)$$

де π – набір запрошуваних полів;

T – множина таблиць, що беруть участь у запиті;

P – множина умовних предикатів фрази *WHERE*;

$f_{вн}$ – внутрішня функція (*COUNT*, *DISTINCT* тощо).

Задамо для даного МП таблицю оновлення (ТО) ΔM як різницю множини рядків БТ до і після модифікації. ТО буде містити множину полів МП m_i, $i=\overline{1,n}$, тип функції оновлення (*Insert, Update, Delete*) і множину полів з P. Для кожної операції додавання, видалення і оновлення даних в БТ, замість безпосередньої модифікації МП, необхідно виконати відповідний запис в ΔM с зазначенням старого (*OLD*) і оновленого (*NEW*) значення полів.

Для складання логічної форми запису функції оновлення введемо наступні позначення:

- $\in_p$ – входження елемента предиката в умову P фрази *WHERE*;
- Π – об'єднання стовпців в єдиний рядок, якщо умова істинна;
- $\cup$ – об'єднання рядків;
- $:=$ – присвоювання;
- $/$ – видалення елемента з множини;
- $\&\&$ – кон'юнкція операцій;
- $||$ – диз'юнкція операцій;
- $=$ – умова рівності двох елементів множини;
- $\neq$ – умова нерівності двох елементів множини.

Для оновлення даних МП в [1] було введено оператор $\overset{\Delta}{\leftarrow}{}^{\alpha}_{\beta}$, де α – умовний предикат ($\alpha \in_p P$), а β

– функція оновлення:

$$New(M) = M \overset{\Delta}{\leftarrow}_{\beta}^{\alpha} \Delta M \quad (2)$$

Істинність α перевіряється для кожної пари рядків $\langle str_i, \Delta str_j \rangle$, $i = \overline{1,b}$, $j = \overline{1,v}$, що належать таблицям M і ΔM відповідно. Якщо для якого-небудь рядка Δstr_j знайшовся такий рядок str_i, що умова α істинна, то необхідно оновити знайдений рядок відповідно до функції β:

$IF\ \alpha = \text{TRUE THEN } \beta\langle \text{str}_\text{i}, \Delta str_j \rangle, i = \overline{1,b}, j = \overline{1,v}$ ELSE RETURN FALSE.

Рядок str_i, що узгоджується з рядком Δstr_j відповідно до умови α, оновлюється наступним чином. Задамо функцію β як трійку виду:

$$\langle C, op1(x_a), op2(x_a) \rangle, \quad (3)$$

де C – умовна функція;

op1 та *op2* – алгебраїчні операції або операції алгебри множин;

x_a, $x_a \in str_i$ – деякий атомарний запис, що зберігається в МП.

Даний вираз відповідає наступному предикату:

IF CONDITION = TRUE THEN $op1(x_a)$ ELSE $op2(x_a)$

а. Оновлення ієрархічного запиту

Розглянемо загальну структуру запиту з ієрархією:

SELECT $T.поле_1$, $T.поле_2$, ..., $T.поле_n$ FROM T
CONNECT BY $T.h_1$, $T.h_2$, ... $T.h_m$
START WITH $T.s_1$, $T.s_2$, ... $T.s_z$
WHERE $T.p_1$, $T.p_2$,..., $T.p_k$,

де $T.s_j$, $j = \overline{1,z}$ – умовні предикати, що задають умову вибору кореневих вершин;

$T.h_i$, $i = \overline{1,m}$ – умовні предикати, що задають умову формування ієрархії.

Наведемо алгоритм оновлення даного типу запитів.

1) При виконанні користувальницької операції INSERT:

Крок 1. Отримати дерево по заданій умові формування ієрархії, для якого коренем буде новий рядок.

SELECT *поля_результату* FROM *назва_таблиці*
CONNECT BY *умова_ієрархії*
START WITH NEW.*умова_початку*
WHERE *умови*

Крок 2. Для кожної вершини отриманого дерева виконуємо перевірку на її наявність в основному дереві, яке зберігається в МП.

Крок 2.1. Якщо вершина знайдена, оновлюємо її поля та переходимо до наступної вершини.

Крок 2.2. Якщо вершина не знайдена, додаємо її в дерево з МП.

β = <new ∈ M, x:=new, M∪new>

2) При виконанні користувальницької операції DELETE:

Крок 1. Отримати дерево по інвертованій умові формування ієрархії, для якого коренем буде новий рядок.

Пояснимо поняття інвертованої умови.

Нехай $h_i = f_{cond}$(PRIOR $T.поле_e$, $T.поле_x$), $e = \overline{1,q}$, $x = \overline{1,q}$, де:

- f_{cond} – деякий умовний оператор,
- PRIOR $T.поле_e$ – поле, відповідне попередньому вузлу ієрархії,
- $T.поле_x$ – поле, відповідне поточному вузлу ієрархії.

Тоді інвертованою будемо називати таку конструкцію:

$\square h_i = f_{cond}$(PRIOR $T.поле_x$, $T.поле_e$), $e = \overline{1,q}$, $x = \overline{1,q}$

Крок 2. Видалити з дерева МП вершини, що зустрічаються в отриманому дереві:

β = <old ∈ M, M/old, x>

3) При виконанні користувальницької операції UPDATE:

Крок 1. Визначити яке з полів рядка було модифіковано.

Крок 2. Якщо модифіковано поля умови формування ієрархії, необхідно виконати послідовно операції видалення вузла дерева, що відповідає старому значенню, і вставки нової вершини. Інакше переходимо до кроку 3.

Крок 3. Якщо модифіковано поля умови пошуку кореневої вершини, перевірити чи є змінена вершина коренем дерева з МП.

Крок 3.1. Якщо вершина коренева, перевіряємо умову пошуку кореня з новим значенням поля. Якщо умова виконана, переходимо до кроку 4. Інакше видаляємо дерево з МП.

Крок 4. Оновлюємо модифіковану вершину:

β = <old = x, x := new, x>

b. Оновлення запиту з використанням аналітичних функцій

Розглянемо загальну структуру запиту, що містить аналітичні функції:

SELECT f_{analyt}(*T.поле_ф*) OVER (PARTITION BY *поле_гр*
ORDER BY *поле_с* [ASC|DESC] (ROWS|RANGE) BETWEEN
((*n*|UNBOUNDED) PRECEDING|CURRENT ROW) AND
((*m*|UNBOUNDED) FOLLOWING|CURRENT ROW))
FROM *T* WHERE $T.p_1$, $T.p_2$, …, $T.p_k$,

де f_{analyt} – аналітична функція;

поле_ф – поле, на основі якого обчислюється аналітична функція;

поле_гр – поле, по якому виконується групування;

поле_с – поле, по якому виконується сортування;

n – нижня межа вікна;

m – верхня межа вікна;

$T.p_i,\ e=\overline{1,q}$ – умовні предикати.

Введемо наступні позначення:

- asc|desc(*поле_с*) – виконання операції ORDER BY *поле_с* ASC|DESC;
- *x* – поточний рядок в курсорі;
- *rownum* – індекс поточного рядка в курсорі;
- *current_row* – рядок МП, що був модифікований в БТ;
- *val* – поле МП, в якому зберігається результат виконання функції.

Розглянемо оператор оновлення аналітичної функції на прикладі наступної синтаксичної конструкції:

COUNT(*поле_ф*) OVER (PARTITION BY *поле_гр* ORDER BY ASC *поле_с*
ROWS BETWEEN UNBOUNDED PRECEDING AND CURRENT ROW)

При вставці елемента необхідно виконати наступну послідовність кроків:

Крок 1. Знайти множину рядків МП, яка задовольняє умові групування. Із знайденої множини необхідно вибрати рядок, який передує новому рядку, і записати значення поля *val* зі знайденого рядка в аналогічне поле нового рядка:

<new.поле_гр = x.поле_гр, desc(поле_с), x>
<new.поле_гр = x.поле_гр &&
x.поле_с<new.поле_с &&
rownum=1, new.val:=x.val, new>

Якщо рядок не знайдено, аналогічним чином необхідно виконати пошук наступного рядка після нового:

<new.поле_гр = x.поле_гр, asc(поле_с), x>
<new.поле_гр = x.поле_гр &&
x.поле_с>new.поле_с &&
rownum=1, new.val:=x.val, new>

Крок 2. Виконати вставку нового рядка:

<true, M∪new, x>

Крок 3. Якщо множина рядків МП була попередньо упорядкована за зменшенням, необхідно відновити початковий порядок прямування елементів:

*<new.*поле*_гр = x.поле_гр, asc(поле_с), x>*

Крок 4. Інкрементуємо значення поля *val* нового рядка і усіх наступних рядків МП, які відповідають умові групування:

<new.поле_гр = x.поле_гр &&
поле_с ≥ new.поле_с &&
new.поле_ф ≠ null, x.val+1, x>

Дана послідовність кроків вказана для фрази *ORDER BY ASC* в синтаксисі запиту. Якщо в запиті зазначено зворотний порядок сортування, необхідно в усіх кроках змінити операції сортування та порівняння (> й <) на протилежні.

Нижче приведено спрощений запис запитів в термінах SQL, що відповідає описаної послідовності кроків:

*SELECT val INTO val_var FROM (SELECT **
FROM MP WHERE поле_гр=new.поле_гр ORDER BY поле_с DESC)

WHERE поле_с<new.поле_с AND rownum<2;

INSERT INTO MP (val, поле_гр, поле_с, поле_ф)
VALUES (val_var, new.поле_гр, new.поле_с, new.поле_ф);

UPDATE MP SET val=val+1
WHERE поле_гр=new.поле_гр AND поле_с> new.поле_с;

При видаленні елемента виконуємо наступне:

Крок 1. Видаляємо старий рядок з МП:

<true, M/old, x>

Крок 2. Декрементуємо значення поля *val* усіх рядків, що передують видаленому та задовольняють умові групування:

<old.поле_гр = x.поле_гр &&
поле_cold.поле_с &&
old.поле_ф ≠ null, x.val-1, x>

При зворотному порядку сортування елементів МП, модифікуємо усі наступні рядки групи:

<old.поле_гр = x.поле_гр &&
поле_с ≥ old.поле_с &&
old.поле_ф ≠ null, x.val-1, x>

Операція модифікації рядка МП, у випадку, коли змінюється значення поля групування, зводиться до послідовності виконання операцій видалення рядка з МП зі старим значенням і додаванням нового рядка. Якщо змінюється поле функції і нове значення дорівнює *null*, виконуємо декремент поля *val* для усіх рядків, наступних за поточним у цій групі:

<new.поле_гр ≠ old.поле_гр, delete(old) && insert(new),

<new.поле_ф ≠ old.поле_ф && new.поле_ф = null,

<old.поле_гр = x.поле_гр &&
поле_с ≥ old.поле_с &&
old.поле_ф ≠ null, x.val-1, x>, x>, x>

с. Перетворення логічного запису функції оновлення на SQL

На рис. 1 наведено розроблений загальний алгоритм генерації функцій оновлення в термінах SQL.

Наведений алгоритм дозволяє перетворити розроблені вище функції оновлення у логічній формі запису до вигляду, придатному для подальшої генерації SQL тригерів для оновлення МП. В ході знаходження у запиті агрегацій, групувань, об'єднань тощо формуються відповідні проміжні функції оновлення, які потім склеюються у результуючу функцію оновлення.

Результати дослідження автоматизованої технології оновлення МП

Порівняємо якість удосконаленої в даній роботі технології генерації функцій оновлення з методом, запропонованим раніше в [1].

Використаємо для цієї задачі журнал виконання трансакцій СКБД за одноденний, тижневий і місячний період роботи досліджуваної ІС. Класифікуємо запити, виконані за вказаний період:

- простий запит (I);
- простий запит з групуванням (II);
- простий багатотабличний запит (III);
- підлеглі запити на вибірку, корельовані запити (IV);
- просте об'єднання за рівністю (V);
- багатотабличний запит (VI);
- ієрархічний запит (VII);
- запит з аналітичними функціями (VIII).

В результаті простого аналізу перерахованих вище журналів трансакцій отримані наступні статистичні дані (табл. 1).

Таблиця 1

Розподіл запитів за різні періоди часу

Часовий період	Кількість запитів виду SELECT	Частка запитів від загального числа, %							
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1 день	11352	9	5	2	15	11	48	7	3
1 тиждень	59626	12	4	4	18	13	37	8	4
1 місяць	242094	10	6	2	13	17	41	8	3

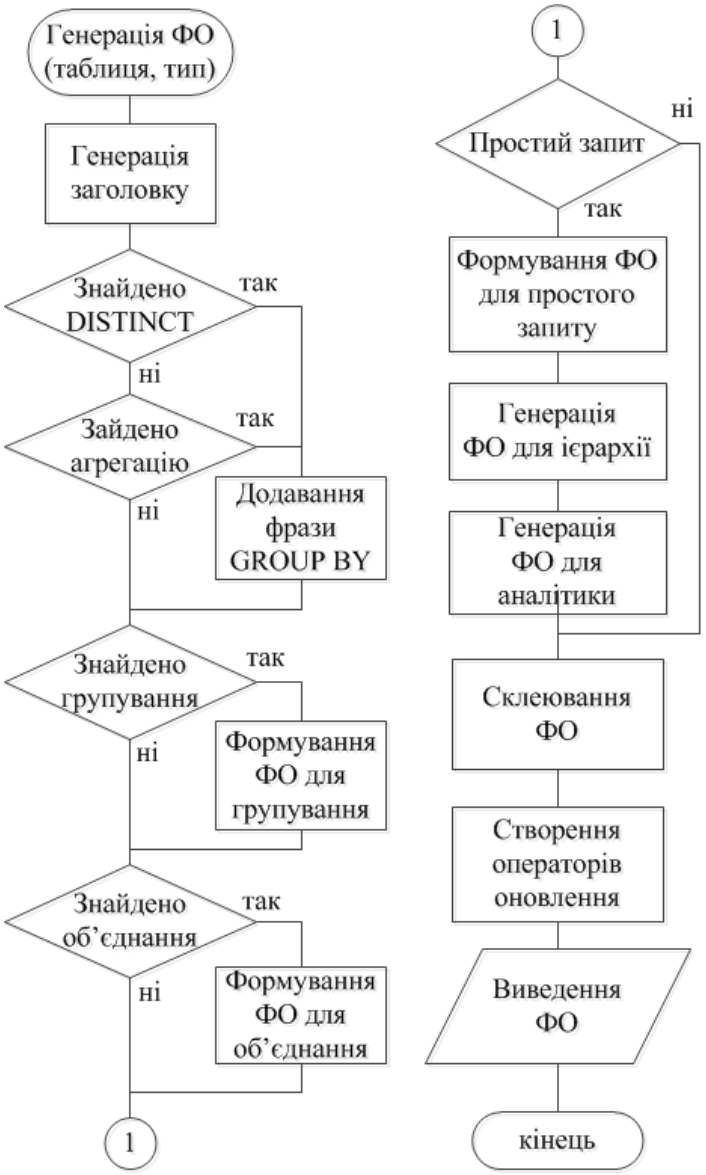


Рис. 1. Загальний алгоритм генерації функцій оновлення

Для оцінки якості розробленої технології генерації функцій оновлення були матеріалізовані всі унікальні запити, що зустрічалися в журналі трансакцій за певний період часу. Отримані результати були усереднені і зазначені в процентних співвідношеннях в табл. 2.

Таблиця 2

Результати матеріалізації запитів

Тип запиту	Базовий метод, %	Удосконалений метод, %
I	93	93
II	92	92
III	89	89
IV	80	80
V	93	93
VI	69	69
VII	0	62
VIII	0	55

Гістограма, яка відображає якість розробленої технології генерації функцій оновлення у порівнянні з базовою, наведена на рис. 2.

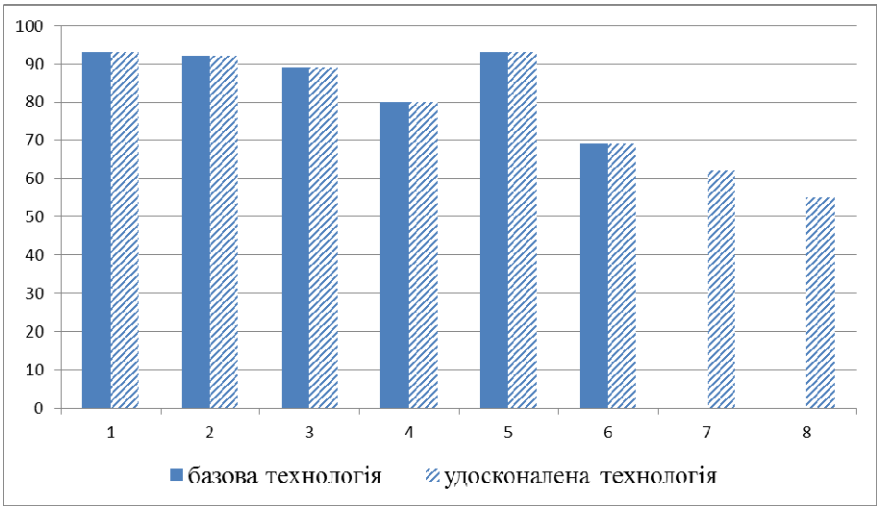


Рис. 2. Порівняння якості технологій генерації функцій оновлення

Гістограма показує, для скількох запитів кожної групи вдалося створити функції оновлення і який відсоток з них виявився логічно вірним. Для груп VII і VIII базовий метод не містить алгоритмів генерації функцій оновлення, тому частка оброблених запитів для цих груп дорівнює 0 %.

Результати дослідження підтвердили можливість запропонованого методу забезпечити створення у середньому на 7 % більше функцій оновлення в порівнянні з базовою технологією. Частка логічно вірних функцій оновлення дорівнює 62 % та 55 % для ієрархічних та аналітичних видів запитів відповідно, що свідчить про можливість подальшої оптимізації створених функцій оновлення.

Обмеженням на використання отриманих результатів є генерація функцій оновлення для складних запитів, що містять одночасно ієрархії, аналітичні функції, кореляції тощо. Дане обмеження викликано все ще досить високим відсотком (до 45 %) помилок синтаксису при генерації запитів.

Дані дослідження є продовженням роботи зі створення автоматизованої технології створення і обслуговування матеріалізованих представлень у методі інкрементального оновлення МП.

Отримані результати доцільно використовувати для оптимізації продуктивності ІС, у яких в якості моделі представлення даних обрана РБД.

Висновки

Була вдосконалена технологія автоматизованого оновлення МП шляхом поширення її на ієрархічні запити та запити з аналітичними функціями:

1. Складено функції оновлення у логічній формі запису для ієрархічних і аналітичних запитів. Для кожної операції додавання, видалення і оновлення даних у базових таблицях надано операції застосовні до таблиць оновлення замість безпосередньої модифікації МП.

2. Розроблено алгоритм перетворення логічних функцій оновлення на тригери мови SQL, що поширює можливості базового методу для матеріалізації ієрархічних запитів і запитів з аналітичними функціями.

З використанням удосконаленої технології вдалося створити у середньому на 7% більше функцій оновлення в порівнянні з базовою технологією, проте помилка в синтаксисі створених функцій оновлення для даних груп запитів ще досить велика.

Література

1. Новохатская Е. А. Методика генерации функций обновления в методе инкрементального обновления материализованных представлений / Е. А. Новохатская, Ю. Н. Возовиков // Вісник СумДУ. Серія «Технічні науки». – 2011. – № 3. – С. 82–96.

2. Gupta H. Incremental Maintenance of Aggregate and Outerjoin Expressions / H. Gupta, I. S. Mumick // Information Systems. – 2006. – Vol. 31 (6). – P. 435–464.

3. Gluche D. Incremental Updates for Materialized OQL Views. / D. Gluche, T. Grust, C. Mainberger, M. H. Scholl // Proc. of the 5th International Conference on Deductive and Object-Oriented Databases. – 1997. – P. 52–66.

4. Grust T. Query Evaluation in CROQUE – Calculus and Algebra Coincide / T. Grust, J. Kröger, D. Gluche, A. Heuer, M. H. Scholl // Proc. of the 15th British National Conferenc on Databases. – 1997.

5. Buneman P. Comprehension Syntax / P. Buneman, L. Libkin, D. Suciu, V. Tannen, L. Wong // SIGMOD Record. – 1994. – Vol. 23 (1). – P. 87–96.

6. Fegaras L. A Uniform Calculus for Collection Types / L. Fegaras // Technical Report 94–030. – Oregon Graduate Institute of Science & Technology, 1994.

7. Fegaras L. An Algebraic Framework for Physical OODB / L. Fegaras, D. Maier // Proceedings of the 5th International Workshop on Database Programming Languages. – 1995. – P. 6–8.

8. Nica A. Incremental maintenance of materialized views with outerjoins / A. Nica // Information Systems. – 2011. – vol. 31 (6). – P. 435–464.

9. Larson P.-A. Efficient Maintenance of Materialized Outer-Join Views / P.-A. Larson, J. Zhou // Proceedings of the 23rd International Conference on Data Engineering. – 2007. – P. 56–65.

10. Griffin T. Incremental maintenance of views with duplicates / T. Griffin, L. Libkin // Proceedings of the ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. – 1995. – P. 316–327.

References

1. Novokhatska, K., Vozovikov, Y. (2011). The method of update function generation for the incremental maintenance of materialized views. Visnyk SumDU. Seriya "Technichni nauky", 82–96.

2. Gupta, H., Mumick, I.S. (2006). Incremental Maintenance of Aggregate and Outerjoin Expressions. Information Systems, 31 (6), 435–464.

3. Gluche, D., Grust, T., Mainberger, C., Scholl, M.H. (1997). Incremental Updates for Materialized OQL Views, Proc. of the 5th International Conference on Deductive and Object-Oriented Databases, 52–66.

4. Grust, T., Kröger, J., Gluche, D., Heuer, A. (1997). Query Evaluation in CROQUE – Calculus and Algebra Coincide, Proc. of the 15th British National Conferenc on Databases.

5. Buneman, P., Libkin, L., Suciu, D., Tannen, V., Wong, L. (1994). Comprehension Syntax, SIGMOD Record, 23 (1), 87–96.

6. Fegaras, L. (1994). A Uniform Calculus for Collection Types, Technical Report 94–030, Oregon Graduate Institute of Science & Technology.

7. Fegaras, L., Maier, D. (1995) An Algebraic Framework for Physical OODB, Proc. of the 5th International Workshop on Database Programming Languages, 6–8.

8. Nica, A. (2012). Incremental maintenance of materialized views with outerjoins, Information Systems, 37 (5). – p. 430–442.

9. Larson, P.A., Zhou, J. (2007). Efficient Maintenance of Materialized Outer-Join Views, Proc. of the 23rd International Conference on Data Engineering, 56–65.

10. Griffin, T., Libkin, L. (1995). Incremental maintenance of views with duplicates, Proc. of the ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, 316–327.

Рецензія/Peer review : 15.11.2017 р. Надрукована/Printed :06.12.2017 р.
Рецензент: к.т.н., проф. Кунгурцев О.Б.

UDC 621.317

I.V. TROTSYSHYN, G.YU. SHOKOTKO
Odessa National Academy of Telecommunications named after A.Popov

IMPLEMENTATION OF THE PRINCIPLES OF THE QUANTUM THEORY OF MEASUREMENT OF AMPLITUDE SIGNAL PARAMETERS, AS THE HIGHER LEVEL OF THE PHASE-DIMENSIONAL MEASUREMENT THEORY

The article is devoted to the demonstration of one of the provisions of the Quantum Theory of Measurements (KTV) in relation to increasing the resolution and performance of the ADC-DAC using an example of the use of the Attenuator-divider Trotsishin. The methodology and systematic analysis of the achieved DAC resolution increase of 10-100 times is presented and their charts of transmission characteristics for the typical values of the binary scale are presented. It is indicated by a close connection with the analogous results obtained in the Phase Frequency Detailed examination of fundamental aspects of quantum theory of measurement and especially the theory of scales of measurement returned implicit acknowledgment that it is a concept fazofrequencies approach and a basis for its fractional-rational scale of measurement is really the highest level of hierarchy as fazofrequencies measurements and measurements of amplitude and other parameters at all. Formation and development of new fazofrequencies approach for measuring the frequency and quantum measurement theory requires revision of existing definitions in the field of metrology parameters of group H, and developing new legal materials that would reflect the current level of knowledge.

Value principles and methodology of the new theory and the results of its importance for the development of measuring instruments can be compared as a ratio of geocentric and heliocentric systems, where it is clear that all the possibilities of representation and measurement parameters of the real picture of the world are at first could also be acquired from the other and vice versa no. Found that when using coincidense quantized values of the scale of the DAC-ADC is much greater than is used in classical binary converters. With increasing attenuator-divider Trotsyshyna resolution increases exponential dependence in comparison with the Kelvin divider resistors with the same quantities. Winning resolution ADT 1024 resistor at more than 300 times, and scale transformation is quite lines Measurement Theory. The main results of measurement of frequency by the method of coincidence are given, and their comparison with classical ones is given.

Key words: Quantum theory of measurements, Attenuator - divider Trotsishina, increase of resolution of DAC. Theory of phase-frequency measurements, the method of coincidence, frequency measurement.

І.В. ТРОЦИШИН, Г.Ю. ШОКОТЬКО
Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова

РЕАЛІЗАЦІЇ ПРИНЦИПІВ КВАНТОВОЇ ТЕОРІЇ ВИМІРЮВАНЬ АМПЛІТУДНИХ ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛІВ ЯК ВИЩОГО РІВНЯ ТЕОРІЇ ФАЗОЧАСТОНИХ ВИМІРЮВАНЬ

Стаття присвячена демонстрації одного із положень Квантової теорії вимірювань (КТВ) стосовно збільшення роздільної здатності і швидкодії АЦП-ЦАП на прикладі використання Атенюатора – подільника Троцишина. Приведено методологію та системний аналіз досягнутих в 10-100 разів збільшення роздільної здатності ЦАП та наведено їх графіки передавальних характеристик для типових значень двійкової шкали. Вказано на тісний зв'язок із аналогічними результатами отриманими в Теорії фазочастотних вимірювань. Приведено основні результати вимірювання частоти за методом коінциденції, та їх порівняння із класичними.

Ключові слова: квантова теорія вимірювань, Атенюатор – подільник Троцишина, збільшення роздільної здатності ЦАП, теорія фазочастотних вимірювань, метод коінциденції, вимірювання частоти.

Entry

Radical view of world, physicists started in the first decades of last century, and rapid development of computer engineering and computer science have recently become the main factors that determined the history of the theory of measurement. Expansion and refinement of the concept of measuring as a result of the study and implementation of a microcosm of measurements into research non-physical variables (economy, sociology, psychology, system engineering, etc.). And essential features designed in modern physics and engineering phenomena (fleeting processes, random processes and fields , multidimensional deterministic and random variables, etc.) along with the difficulty of their measurement processes and higher standards for accuracy and performance measurement procedures have become a powerful impetus for the emergence and development of new concepts of fundamental and applied levels of theory of measurement and metrology. This kind of search development and implementation especially in science and engineering environment of new measurement methods, based on new conceptual basis is relevant, and has its specific features. If the first two components in general depend on the researcher is at the stage of recognition of the new - everything is still on the old, which is the actual problems of modern science.

Measurement as an important part of knowing the world

From ancient times to the present day measure as one way of learning play an important role in human life. First person in their daily activities satisfied the information is delivered only by his feelings, and then raised them in aid of measuring devices. The aim is to obtain a quantitative measurement of information about the size of the investigated object, understood as actually existing objects (things, processes, fields, events, etc.) of the material world as well as interaction between them. Measurements can be performed both cognitive (the study of elementary particles, the human body, etc.), and in the application (domain specific process, quality control) problems. There is a strong correlation between technological progress and achievements in the field of measurement and measuring

instruments. An important part of most research is measurement, allowing establishing quantitative relations and laws of the phenomena. The importance of measurement in achieving scientific results repeatedly recognized famous scientists: "We measure everything measurable dimension and do that as yet defies measurement" (Galileo Galilei), "Science starts with since starting to measure, exact science is inconceivable without measures" (D.I. Mendeleyev) [1-4].Any modern production should be equipped with measuring tools that allow accurate and objective control of the process. Depends on this level of product quality and productivity. In automated production timely receipt of necessary information accurate measurement is one of the most important conditions for good management of the subject regulation. On the other hand, the development and perfection of technological processes in obtaining new materials and elements create opportunities for improvement and creation of a new measuring technique.

Progress in the field of measurement and measuring instruments is unthinkable without the development of measurement theory ("Nothing is more practical than good theory!) The basis of any measurement process, whatever the object of measurement, the measured physical quantity, the principle of measurement, method of processing information, etc., are the same patterns. The study of these patterns, the problem of optimizing measurement experiment under different conditions of measurement and impact of major sections devoted to the measurement theory, taught all the theories of language - the language of mathematics. Moreover, accurate measurement procedure relies on the correct definition of the purpose and features of measurement. This finds expression algorithmization measurements, when a meaningful description of the procedures and results formalized replaced.

The content and features of the measurement process and measurement procedures

The term "measurement of physical quantities" according to RMG 29-99 [1] is defined as "the set of operations on the application of a technical device that keeps the unit, providing the ratio of stay (in the form of explicitly or implicitly) the measured value of its units and obtaining the value of the value.

There are other formulations the concept of "measurement" [3], "Measurement is the process of obtaining information that is measured by comparing the test and known quantities or signals, the necessary logical operations and representation of information in numeric form. In [4] given another definition: "Measurement - obtaining a numerical value (value) values characterizing the physical properties of the object (object, process, phenomenon) that the experiment (by research) that satisfies the requirements of ensuring uniformity measurements, based on the comparison operation is an analog value from a model (measure value). Measurements may be subject not only physical quantities but also functional dependence that characterize the properties of the object of measurement. In this case, held or measuring at fixed values of the argument (usually time or space coordinates), or measurement functions using a degree that reflects a model dependence.

Ways to describe measurement procedures and measurement results Often used to describe the measurement equation that establishes a connection with the measurement result of input and executable transformations that can be analog (check symbol), analog-digital (ADC) and digital (DAC).

Depending on the quality of the equipment implementing the transformation algorithm can be divided into nonideal (N denote the index of the corresponding symbol forms of transformation) and ideal (no index). If adopted by the transformation algorithm, which allows the ideal hardware implementation to obtain the measurement result as the true value of the measuring, this transformation is called hypothetical (d), depending on quality measurement algorithms transform equation can be represented in three configurations [4]:

- Measurement equation that takes into account the inadequacy of the equipment implementing the algorithm

$$X_i^* = R_{\#}^{н} K^{н} R_a^{н} \gamma_i \qquad (1)$$

where X_{uj}^* – the measurement result obtained by measuring and second experiment; γ_i – Of input;

Measurement equation, which represents the adopted algorithm

$$X_{uj}^* = R_{\#} K \; R_a \gamma_i \qquad (2)$$

where X_{uj}^* - the measurement result obtained by implementing the ideal algorithm;

Measurement equation, which represents the true value of the measuring X_j (hypothetical algorithm)

$$X_j^* = R_{\#}^{д} K^{д} R_a^{д} \gamma_i \; . \qquad (3)$$

A special place is the analog-digital (A-D) conversion, during which carried out three operations: quantization, compared with a measure of sampling. The last of them linked to the fact that each digital value corresponds to a fixed point in time, or with fixed spatial coordinates. If there is a discrimination in time, the transition from continuous functions $j(t)$ to discrete sequences, implemented using delta - functions $\delta(t)$ can be described as follows:

$$\varphi(t) \to \{\varphi(t_i)\} = \left\{ \int_T \varphi(t)\delta(t-t_1)dt \right\}, t \in T \quad (4)$$

Where T-time observation.

After the uniform quantization with step sequence $\Delta_{k\varphi}$ is converted into a sequence of discrete $j(t)$ numerical values:

$$\{K(t)\}_{i=1}^{m} = \left\{ E\left[\frac{1}{\Delta_{k\varphi}} \int_T \varphi(t)\delta(t-t_1)dt \right] \right\} \quad (5)$$

Where E-band measurements.

Given that the ideal operation of ADC is sufficient for routine measurement of physical quantities, and given the availability of classic case of methodological and instrumental errors [5], we consider it appropriate to extend it search into the question of inadequacy of mathematical models and mathematical provisions, which are the based on new views on the nature of things. Therefore, the current guidance will be several examples of such basic things.

Attenuator-divider Trotsyshyna and classical divider Kelvin.

A typical example that characterizes the possibility of obtaining essentially new qualitative and especially quantitative parameter measuring the scale is to compare the classical Kelvin divider [5], and use all possible (quantum) states of the same divider (resistor-chain), called Attenuator -divider Trotsyshyna (ADT). Fig. 1. 2. adjusted their scheme for visual example of the chain 8 the same value resistors.

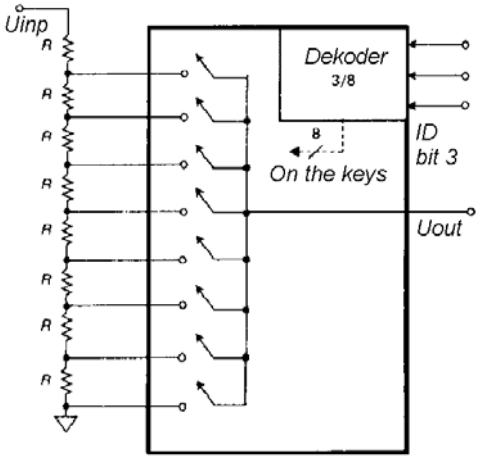


Fig. 1. Divider of Kelvin

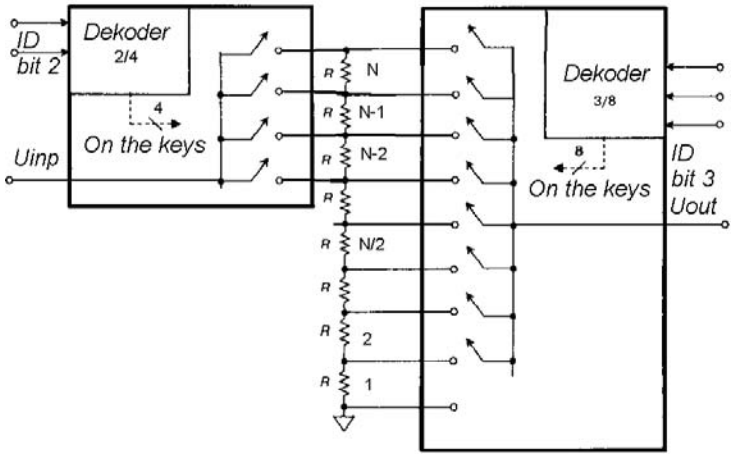


Fig. 2. Divider-attenuator circuit for Trotsyshyna 8R

The simplest of all structures where the DAC is possible to compare the Kelvin divider, or tandem, as shown in Figure 1. N-bit DAC that consists of identical resistors connected in series and keys (typically CMOS), one between each node and the circuit output. Output circuits, organized one of the keys connected to the appropriate branch. The idea of the DAC dating back to Lord Kelvin mid 1800's. This simple architecture uses the output voltage (in which the output impedance depends on the code) and is quite good monotony. Even if you are accidentally closed resistor, the output signal and the signal and not exceed + 1 exit. Under the equality of all resistors that AP has a linear scale. However, it can easily be made nonlinear, if need be linear DAC. Due to the fact that at the time of switching are only two keys, in such architecture rarely occurring emissions. In addition, since emissions are independent of the code, the DAC is suitable for applications designed for low distortion signals.

The main disadvantage divider DAC (Kelvin) is a large number of resistors and keys necessary to achieve high resolution (conversion degree). For this reason it is not treated extensively used the DAC with a simple architecture of the arrival of tiny integrated circuit, opened its practicality DAC for low and medium accuracy. Today, this architecture is widely used in simple DAC, such as digital potentiometers, and is part of more complex structures of high-resolution DAC [5].

The objective of the proposed method is to increase the resolution divider (the number of quantized values of the scale transformation) and expanding functionality through adaptive selection of transformation characteristics.

The problem is solved by constructing the attenuator-divider Trotsyshyna (ADT), which is to use kodomo managed switching points of the intermediate range of compounds N series resistors connected to the same value, which at the top (extreme output line resistors) is input voltage, and the bottom (extreme output line resistors) connected to a common output attenuator-divider (divider Kelvin), differs in that, to increase the number of quantized output values of the scale points of AP, to values greater than N (Kelvin divider), the input signal is fed to kodomo managed output (point of connectivity) from the top down and the following N to N / 2, thus switching the input voltage at the output of the top N sells classical scale transformation of N values, and using the following

intermediate points N-1 to N / 2 we get, in addition to the existing N even more quantized value of the scale transformation

$$N_i = \mathrm{mod}_{\le 1,000}\left\{\frac{A_j}{B_k}\right\},\ j,k \in 1 \div N \tag{5}$$

Apt scheme for the case N = 8 resistors shown in Figure 2. The work method is consistent switching of ADT by successive values of the scale transformation which provides input and output switches, the algorithm specified by mode switching.

For comparison, conduct calculations of quantized values for the scale transformation of classical Kelvin divider and attenuator- divider Trotsyshyna (ADT), for typical values of resistors (same for both). The table shows typical values Kelvin AP and ADT and their comparative ratio.

Table 1

ADT comparison and Kelvin AD

Number of resistors NR (N AD Kelvin)	2	4	8	16	32	64	128	256	1024
The number of quantum dots scale ADT	2	6	22	80	324	1260	5022	19948	318964
Growth quantized values	0	2	14	64	292	1196	4894	19692	317940
Win	1	1,5	2,75	5	10,125	19,69	39,08	77,92	311,5

View Apt scale conversion for 8 resistors (8R) in normalized values are given in Fig. 3. At the same time, the same number 8R scale transformation for the case of Kelvin divider, we obtain the classical scale is shown in Fig.4.

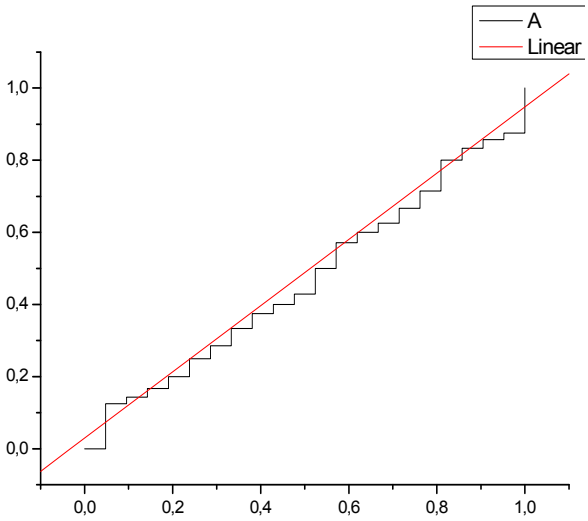


Fig. 3. Quantum scale transformation ADT_8R

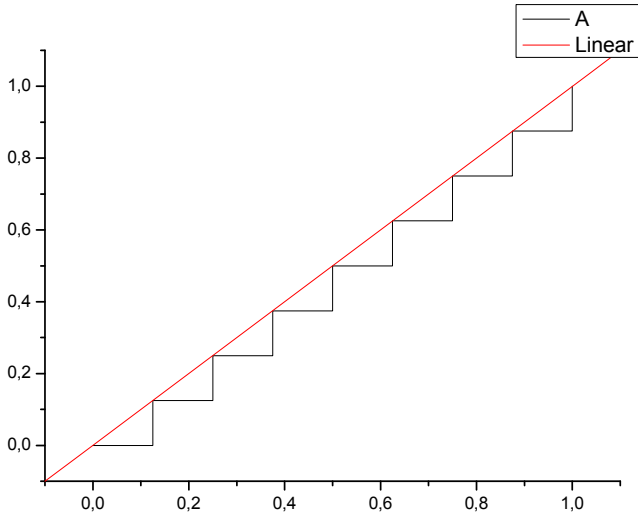


Fig. 4. Quantum scale transformation Kelvina_8R AD

It is obvious substantial increase in resolution and scale transformation is winning (see Table) only 2.75 times, while already at ADT_16R, will win 5 times (80 instead of 16 divisions of the scale!), Which are shown in larger scale in Fig. .5.

The equations of quantum scale transformation can be written as:

$$N_i = \mathrm{mod}_{\le 1,000}\left\{\frac{A_j}{B_k}\right\},\ j,k \in 1 \div N \tag{6}$$

which case the AD Kelvin will look like:

$$N_i = \mathrm{mod}_{\le 1,000}\left\{\frac{N_i}{2^n}\right\},\ i \in 1 \div N \tag{7}$$

that of a partial case AD Trotsyshyna.

Principles and methods of the theory FFM and CRS

Within the developed theory of measurement and transformations fazofrequencies radio (FCHV and PR), we managed not only to prove the inadequacy of classical approaches and models, but also suggest a new - fazofrequencies approach that not only free from those drawbacks, and opens new opportunities still unknown not only in the field of measurement and information theory, signal theory, etc. [6].

Briefly, the essence is that the frequency is defined as the derivative of the total phase and all measuring

devices, implement algorithms accumulation (ie integration), which is the inverse operation to find the derivative. So, obviously, but decades of devices measured at what is basically does not exist in nature (frequency - H group, phase shift - Group F). At the present stage it appears that even super-modern equipment that have high metrological characteristics rapidly lose them when you access the signal decreases, or when it is unknown a priori, especially when signals are modulation - that is the radio signals (or the interpretation of the authors - in such Basically there are all really existing signals). The classical approach to explain these phenomena can not, because using idealized models (from the sinusoid), which is an abstraction, but only for such models, and hence all the problems.

Moreover, the desire to use simplified models, suitable methods of harmonic analysis have led to catastrophic errors in measurement theory is when a single scale measuring full phase shift (FPS), was divided into two separate: frequency (group H) and phase (group F) representing the first approximation and a small part of a single scale. Thus, it is clear what the causes and problems of measurement is azofrequencies measurements rather than measuring the frequency and phase in the classic sense, for which there is no real signals. Pain in detail the specifics of the concept of "frequency" on the radio signals given in [5,6-9].

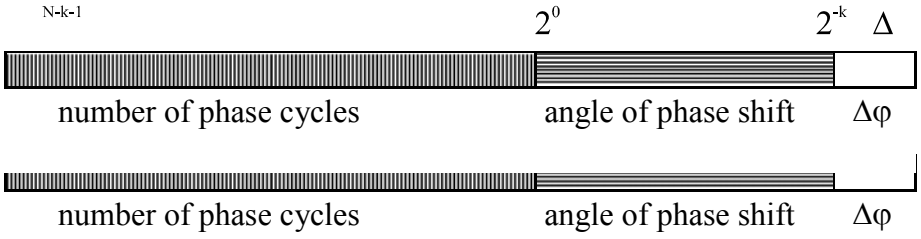


Fig. 5. Complete scale of phase-dimensional measurements

But as it turned out, the proposed theory FFM and CRS, based on the concept azofrequencies approach to the problem of measuring "frequency" and "phase" electrical signals appeared even "technological" and "ideological" research direction in the field of measuring instruments, and specifically it fazofrequencies parameters.

First, we not only abandoned the classical concepts, but also established and proved that for those of real signals (which merged into the overall rating and was named radio signals) that are the beginning and end, and they all have fundamental differences from ideal "sine." Yes, they do not exist terms "frequency" and "phase shift" in its classic sense which is regulated by GOST, ISO, as these parameters, as already stated, are introduced and there are "only for ideal signals (sine wave with no beginning and end), and this is the absolute idealism. Therefore, the "frequency" and "phase" - does not really exist, and can not be measured, for today's real signals demonstrate a simple example: no precision Frequency impossible to measure with a specified accuracy BEARING mobile phone, even in active mode, the more in standby mode, similar problems in measuring the parameters of HMS, and more.

But the new theory does not waive the "frequency" and "phase shift", and establishes a causal link them and adequate to the actual process definition. The foundation theory FFM and CRS is the statement that for real signals (radio) there is a concept of full phase shift (FFS) $\Psi(t)$ and derivative $d\Psi(t)/dt = \omega(t) = 2\pi f(t)$ - which is the "instantaneous frequency", and analyzing the behavior changes and extremes $\Psi(t)$ can find all the known (and new) options as the "frequency" and "phase." This definition does not contradict the "classical" definition, which we will be limiting case $\Psi(t) \in (-\infty \le t \le +\infty)$, if that, and this is an idealization.

Moreover, measuring instruments, which we have developed a new theory based on only a last resort and at simplifying the scheme and provide functionality known variants of existing "traditional" methods and devices which are partial cases azofrequencies meter [8-9]. The theory is incomplete, as not only covers the analysis (measurement), but also the synthesis (formation and transformation) azofrequencies parameters of radio signals. For instance on the same technological level (performance components, circuits) by changing the configuration (scheme firmware) we received synthesizers, which are twice as higher frequency source (or rather sequent) and smaller spurt phase, (both increased and speed and accuracy).

In addition, we detected a completely new properties that do not and can exist in classical representations, that can say that the zone properties of the new theory in comparison with "classic" is, so-to speak, "a complex component, and its projection on the set of real numbers "gives" classical system ". So you want to explore new opportunities that have lie outside our representations in both measurements and processing signals, and so on.

In theory FFM and CRS instead of two independent scales (whole part - H devices group and the fractional part - devices group F), using a single scale of rational numbers, which include the addition of whole and infinite number of intermediate (possible) values of "fractional" (see. Fig. Scale [6]).

Thus, to distinguish signals from our example is not necessary to wait $T_{mes.\min} \ge 1c$, perhaps for that $T_{mts.\min} \sim 1мс$ at times 10^3 faster than ECFM [9], on this theory indicates FFM and CRS (Fig. 7) [10].

To complete and confirm the only source of progress to increase the resolution as the ADC-DAC and fazofrequencies settings within cable KTM here's a sampling scale coincidence winning growth compared with the classical (Fig.7) and comparison resolution of frequency measurer based on coincidence and CNT-90 (which is "best in the world") Fig. 8.

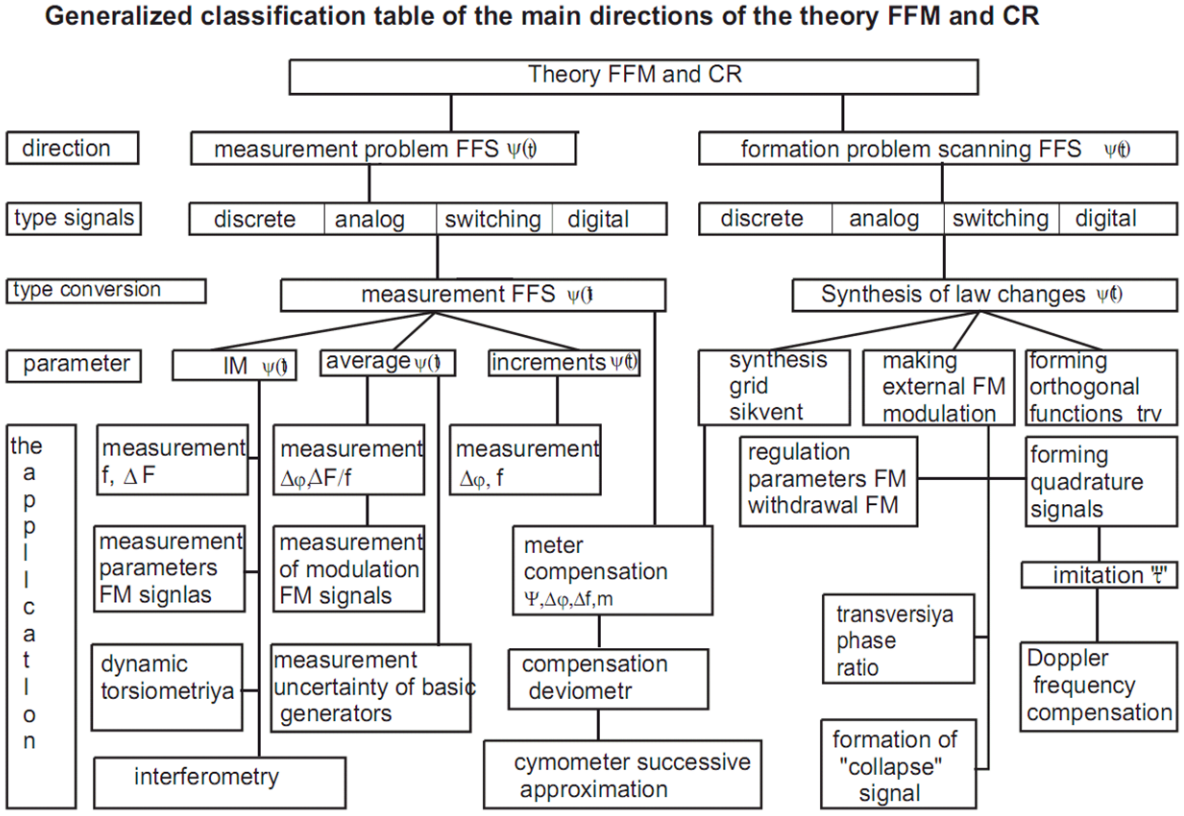


Fig. 6. Generalized classification table of the main areas of application of the theory FFM and CR [6]

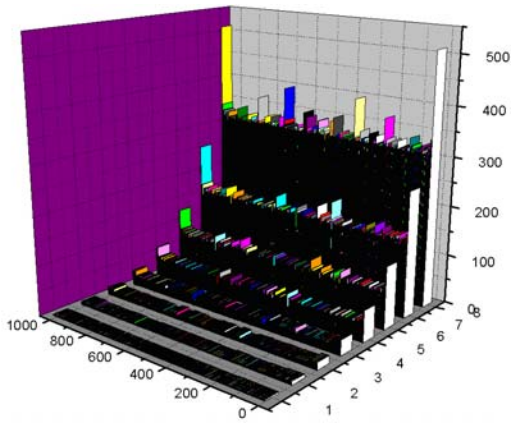


Fig. 7. Dynamics of the grouping of "fractional divisions" within the classical scale 1-1024

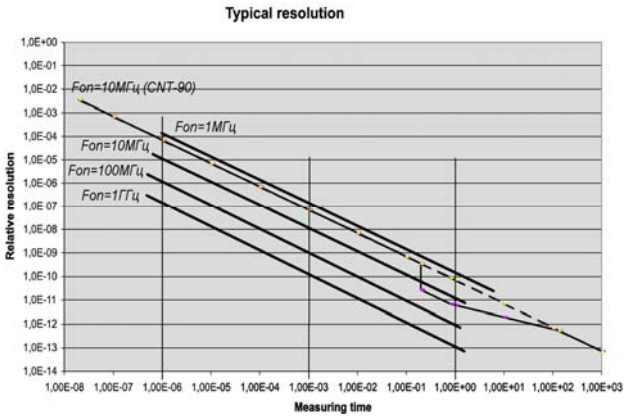


Fig. 8. Comparison of Frequency coincidence with "best in the world" Frequency CNT-90

Winning coincidence method over other known digital methods may be estimated as [11]:

$$B = \frac{\delta_{fккласи}}{\delta_{fккоін}} = \frac{\sqrt[3]{f_{on}T_{вим}}}{\left(\frac{2}{T_{вим}f_{on}}\right)^2} = \frac{3}{4}\cdot f_{on}T_c = \frac{3}{4}\cdot N_{on} = 3\cdot 2^{n_{on}-2} \quad . \qquad (9)$$

Specified analytical expression evaluation winnings in complex settings (speed x accuracy of measurement) shows the same functional dependence that we observed examining divisions on the scale of measurement Frequency coincidence depending on the digit (values) represent the results in the numerator and denominator counters

Indeed, experimental work, confirming the theory and has no desire for other experimenters to check the results again. Her place in the review article. Experimenters will remember her only in rare cases if the theory that tested to be found any defect, if it will be incomplete or erroneous. The story of the publication that refutes the theory. She immediately gets the opposition represented by the authors and supporters of the theory. All its data and conclusions undoubtedly will be thoroughly analyzed to detect possible errors. Moreover, such work must be re tested by independent researchers.

Apparently, the publication of work that refutes the theory requires, generally speaking, more thorough research, more highly qualified researchers and determined courage, at last.

Conclusion

Detailed examination of fundamental aspects of quantum theory of measurement and especially the theory of scales of measurement returned implicit acknowledgment that it is a concept fazofrequencies approach and a basis for its fractional-rational scale of measurement is really the highest level of hierarchy as fazofrequencies measurements and measurements of amplitude and other parameters at all.

Formation and development of new fazofrequencies approach for measuring the frequency and quantum measurement theory requires revision of existing definitions in the field of metrology parameters of group H, and developing new legal materials that would reflect the current level of knowledge.

Value principles and methodology of the new theory and the results of its importance for the development of measuring instruments can be compared as a ratio of geocentric and heliocentric systems, where it is clear that all the possibilities of representation and measurement parameters of the real picture of the world are at first could also be acquired from the other and vice versa no. Found that when using coincidense quantized values of the scale of the DAC-ADC is much greater than is used in classical binary converters.

With increasing attenuator-divider Trotsyshyna resolution increases exponential dependence in comparison with the Kelvin divider resistors with the same quantities. Winning resolution ADT 1024 resistor at more than 300 times, and scale transformation is quite lines.

References

1. Trotsyshyn I.V. Measurement of electrical and radio frequency: - illusion and reality (why and where are the "paradoxes" and their removal) / Trotsyshyn I.V. // Proceedings of the V-th mizhnaraodnoyi Scientific and Technical Conference "Metrology and Measuring Equipment" (Metrology 2006). - Kharkiv, 2006. - S. 235-240.

2. Kharkevych A.A .The spectra and analysis / A.A. Kharkevych 4th edition.-M.:, Gi FML, 1962-236 s.

3. Fynk. LM Signals, interference, error / Fynk. L.M.-2 st edition, re slave. and add. M.: Radio and Communications, 1984. 256 p.

4. P.P. Ornatskyy. Introduction metrology to the science of measurement / Ornatskyy P.P.. K.: High School. 1994-149 s.

5. W. Kester, Analog-Digital converting / W. Kester. - M: Technosphere, 2007. - 1019.

6. I.V. Trotsyshyn. Measuring and converting fazofrequensy radio parameters / I.V. Trotsyshyn. - Khmelnitsky, PE Kowalski V. - 2002. - 382 p.

7. Trotsyshyn I.V. Theory fazofrequensy measurement and transformation parameters of radio signals in the hierarchy of research methods ranging measurement frequency / Trotsyshyn I.V., Trotsyshyna L. // Herald of Khmelnitsky National University. - Inc. - 2008. - № 3. - S. 153-158.

8. Trotsyshyn I.V. Frequency, phase shift angle, the full phase shift: - illusion and reality // Measuring and computing in industrial processes. -2005. - № 2. - C. 193-198.

9. Trotsyshyna L. Measurement of frequency by the method coincidense / Trotsyshyna L.V., Voityuk O.P., Trotsyshyn I.V. // Measuring and computing in technological processes. - 2005. - № 2. S. 198-203.

10. Trotsyshyna L. Phase frequency approach to measure incidence and radiosignals frequencymehter coincidence // "Young and Modern Problems of Radio Engineering and Telecommunications," "PT-2006. Proceedings of the International scientific conference of students, graduate students and scientists. - Sevastopol- S. 93-97.

11. Trotsyshyn I.V. Measurement of frequency by the method of formation and features coincidence scale measuring conversion / I.V. Trotsyshyn IV, A.P. Voityuk., L. Trotsyshyna // Herald of Khmelnitsky National University. – 2009. – № 3. – S. 240–244.

12. Gula I.V., Horyaschenko K.L., Mishan V.V. Influence of irregularity of the signal of the reference oscillator spectral signal analysis in phase range measuring. Khmelnytskyi. Measuring and Computing Devices in Technological Processes. Issue 3. Pp. 100–103.

13. Horyaschenko K.L., Gula I.V. Errors of measuring in method of multicoincidence. Proceedings of the International Scientific Conference "Measuring and computing in technological processes." Odessa, 6-12 June 2014 - S. 83–84.

Рецензія/Peer review : 13.11.2017 р. Надрукована/Printed :07.12.2017 р.
Статтю представляє д.т.н., проф. Троцишин І.В.

УДК 004.912

О.В. МАЗУРЕЦЬ
Хмельницький національний університет

ОНТОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО ПОБУДОВИ СЕМАНТИЧНОЇ МОДЕЛІ НАВЧАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

В статті досліджено проблему застосування онтології як методу формального опису знань, що містяться в навчальних матеріалах. Запропоновано модель онтології навчального матеріалу, що складається з ключових слів, ключових термінів, структури навчального матеріалу, атрибутів ключових слів та ключових термінів. Онтологія навчального матеріалу за даної моделі може бути методом виявлення сенсу навчального матеріалу та засобом розв'язання ряду практичних задач щодо сенсу навчальних матеріалів. Розглянуто тестовий програмний продукт, що дозволяє автоматизовану побудову онтології навчального матеріалу за даною моделлю. Цей програмний продукт будує онтологію навчального матеріалу шляхом співставлення структури цифрового документу з множинами ключових термінів. Стилістичні вимоги до оформлення електронних документів навчальних матеріалів вимагають використання для цього спеціальних стилів, тому структура цифрових документів навчальних матеріалів регламентується мовами розмітки цифрових документів й реалізується через систему заголовків. Формування множини термінів проводиться із використанням методу дисперсійного оцінювання, який показав свою достатню ефективність у попередніх дослідженнях. З використанням методу дисперсійного оцінювання виконується пошук ключових слів. Для формування множини ключових словосполучень проводиться пошук неперервних скупчень ключових слів в тексті й знайдені зразки додаються у множину ключових словосполучень. Наведено практичні задачі, що можуть бути розв'язані шляхом застосування запропонованої моделі онтології навчального матеріалу. Це такі задачі, як оцінка відповідності навчальних матеріалів вимогам, оцінка відповідності наборів тестових завдань навчальним матеріалам, автоматизована генерація прототипів тестових завдань, реалізація гнучких алгоритмів тестування, автоматизація формування рефератів та анотацій до елементів навчальних матеріалів та інші. Подальші дослідження спрямовані на визначення ефективності застосування запропонованої моделі онтології навчального матеріалу для розв'язання наведених практичних задач.

Ключові слова: онтологія, навчальні матеріали, ключові слова, ключові терміни.

O. MAZURETS
Khmelnyitsky National University

ONTOLOGICAL APPROACH TO BUILDING A SEMANTIC MODEL OF EDUCATIONAL MATERIALS

The article examines the problem of use of ontology as a method of formal description of knowledge which contained in educational materials. The model of teaching material ontology, which consists of keywords, key terms, structure of educational material, keyword and key terms attributes, is proposed. The ontology of educational material of this model can be a method of identifying the meaning of educational material and the tool of solving of practical problems regarding the meaning of educational materials. The test software product, which allows the automated generation of the ontology of educational material according to the proposed model, is considered. This software product builds ontology of educational material by comparing the structure of a digital document with a list of key terms. Stylistic requirements for the preparation of digital documents of educational materials require the use of special styles, therefore the structure of digital documents of educational materials is regulated by the languages of marking of digital documents and is implemented through the system of headings. Making of a list of terms is performed using the dispersion estimation method, which has shown its sufficient effectiveness in previous researches. Using the dispersion estimation method, keywords are searched. To generate a list of key phrases, the search for keyword clusters in the text is searched and the samples found are added to the list of key phrases. The practical problems that can be solved by using of the proposed model of the ontology of educational material are considered. These tasks are such as valuation of the conformity of educational materials to requirements, valuation of the conformity of sets of test tasks to educational materials, automated generation of test tasks prototypes, implementation of flexible test algorithms, automatization of the generation of abstracts and annotations to elements of educational materials and others. Further research are aimed at determining the effectiveness of applying the proposed model of educational material ontology to solve the above practical problems.

Keywords: ontology, educational materials, keywords, key terms.

Постановка проблеми в загальному вигляді

При вирішенні широкого кола задач в галузі сучасної вищої освіти виникає ряд проблем, вирішення яких в традиційному ручному режимі є надмірно трудомістким та суб'єктивним [1]. До цих задач відносяться зокрема оцінка відповідності навчальних матеріалів вимогам, оцінка відповідності наборів тестових завдань навчальним матеріалам, допомога та контроль якості при формуванні навчальних матеріалів, допомога та контроль якості при формуванні тестів до навчальних матеріалів, автоматизована генерація прототипів тестових завдань, реалізація гнучких алгоритмів тестування, автоматизація формування рефератів та анотацій до елементів навчальних матеріалів тощо. Особливої актуальності це набуває в умовах використання сучасних спеціалізованих віртуальних навчаючих середовищ на кшталт Moodle. Наведені задачі можуть бути вирішені шляхом автоматизованих побудови та використанню семантичної моделі навчальних матеріалів, за допомогою якої інформаційні системи можуть отримати здатність працювати з елементами навчальних матеріалів як семантичними системами [2].

Аналіз останніх досліджень

Проблеми автоматизації навчання та контролю отриманих знань шляхом роботи з елементами навчальних матеріалів за допомогою інформаційних систем ґрунтовно досліджені в літературі. Роботи сучасних вітчизняних та закордонних авторів охоплюють широке коло задач та методів їх вирішення.

Наприклад, ведуться дослідження в напрямку створення технологічних автоматизованих систем навчання й оцінювання [3], які дозволяють скоротити час контролю знань, оптимізувати плани навчання й самонавчання, об'єктивізувати процеси оцінювання; розглядаються засади створення високоефективних інтелектуальних систем професійної підготовки, відмінною рисою яких є адаптивність навчання, оцінювання й багатокритеріальність контролю знань. Також ведуться дослідження в напрямку автоматизації створення тестових завдань на основі понятійно-тезової моделі [4, 5], в рамках яких смислова інформація, яка формалізується в семантиці моделі, виділяється безпосередньо із тексту навчального фрагменту, а процес формування бази знань фактично являє собою осмислене читання навчального тексту.

Більшість авторів відзначає, що з змістовної точки зору ключовою властивістю контенту навчального матеріалу є його семантика, яку формалізовано відображають у вигляді семантичної мережі [6]. Звичайно така схема складається зі структури даних, що містить всі релевантні класи об'єктів, їхні зв'язки й правила предметної області. За моделлю така структура відповідає онтологіям, які використовуються в процесі програмування як форма подання знань про реальний світ або його частину. Онтології застосуються для моделювання семантичних мереж, бізнес-процесів, у штучному інтелекті. Тому застосування онтологічного підходу до побудови семантичних моделей навчальних матеріалів визначається актуальним.

Постановка задачі

Метою статті є аналіз онтології як методу формального опису знань, що містяться в навчальних матеріалах, визначення моделі онтології навчального матеріалу та дослідження можливості її автоматизованого формування комп'ютерними засобами для вирішення прикладних задач.

Викладення основних матеріалів дослідження

Незважаючи на те, що термін «онтологія» має походження з філософії, в комп'ютерних науках він одержав самостійне значення та широке використання [7]. При цьому характерною рисою використання терміну в комп'ютерних науках є те, що онтології в інформатиці повинні мати формат, який комп'ютер зможе легко обробити. Крім того, онтології в комп'ютерних науках створюються з конкретною метою вирішення певних практичних завдань, у зв'язку з чим вони оцінюються більше з погляду застосовності, ніж повноти.

Онтології являють собою опис знань, зроблений достатньо формально, щоб бути прийнятним для обробки комп'ютерами. Термін «онтологія» вперше вжито в роботі Томаса Грубера [8], у якій розглядалися різні аспекти взаємодії інтелектуальних систем між собою та з людиною.

Знання, що закладені в комп'ютерних програмах, можна розділити на процедурні та декларативні. Процедурні знання є інформацією про те, що треба робити в кожній конкретній ситуації. Декларативні знання є інформацією про предметну область, без чого не можна побудувати алгоритм програмної системи. Таким чином, при створенні інтелектуальної системи доводиться враховувати такий поділ знань і придумувати певні програмні інструменти для оперування цими знаннями. Томас Грубер розглядав питання взаємодії інтелектуальних систем між собою, а також з людиною. Ідея Грубера полягала в тому, щоб дозволити інтелектуальним системам обмінюватися між собою закладеними в них знаннями про предметну область [7]. Якщо усередині інтелектуальної системи знання про предметну область можуть бути закодовані як завгодно, то для обміну цими знаннями з іншою інтелектуальною системою необхідно надати опис цих знань. Цей опис повинен бути достатньо формальним, щоб бути зрозумілим іншій системі, а також повинна бути відомою мова цього опису. Також опис повинен бути зрозумілим і людині. Для цього Грубер запропонував описувати знання двома способами – у канонічній формі (опис знань мовою логіки предикатів) та у формі онтології (множина класів, зв'язаних між собою). Таким чином, онтологія за Груберуом являє собою опис декларативних знань, зроблений у вигляді класів з відношенням ієрархії між ними. До цього опису, призначеному для читання людиною, доданий опис у канонічній формі, що призначений для читання інтелектуальною системою. Кожна інтелектуальна система може надавати кілька таких описів, що відповідають різним областям декларативних знань, що зберігаються в ній і, таким чином, виступає як сховище бібліотеки онтологій. Грубер вважав, що інтелектуальні системи будуть виступати як бібліотеки онтологій і вільно обмінюватимуться онтологіями між собою.

Наведений поділ специфікацій знань на дві складові не є зручним, тому що доводиться описувати ті самі знання два рази. Тому на сучасному етапі під онтологією розуміється будь-який опис декларативних знань, зроблений формальною мовою й оснащений деякою класифікацією знань, яка дозволяє людині зручно сприймати їх. Канонічна форма не обов'язково використовує мову логіки предикатів, проте будь-який такий опис повинен містити в собі подання декларативних знань у вигляді ієрархії об'єктів, й тільки в цьому випадку цей опис може вважатися онтологією [9].

Сучасні онтології будуються переважно однаково, незалежно від мови написання, й складаються з екземплярів, понять, класів, атрибутів і відношень.

- Екземпляри є сутностями, що складають нижній рівень онтології. Загалом, структура онтології не вимагає включення конкретних об'єктів, але оскільки однією з головних цілей застосування онтології є класифікація таких об'єктів, то вони зазвичай включаються.

- Поняття виступають абстрактними множинами об'єктів й можуть містити в собі екземпляри..
- Класи онтології становлять ієрархію понять.
- Атрибути є властивостями об'єктів онтології. Кожен атрибут має принаймні ім'я та значення, і використовується для зберігання інформації, що специфічна для об'єкта й прив'язана до нього.
- Відношення визначають залежності між об'єктами онтології. Зазвичай відношенням є атрибут, значенням якого є інший об'єкт.

Семантика начального матеріалу виражається його логічною структурою (наприклад: Дисципліна / Розділ / Тема) та поняттями, що розглядаються в ньому. Очевидно, що ієрархія змістовних блоків визначає верхній рівень вертикальної онтології відповідної навчальної дисципліни. Якщо розглядати ієрархію змістовних блоків начального матеріалу як рівні вертикальної онтології відповідної навчальної дисципліни, то, з семантичної точки зору, ключові терміни є найнижчим рівнем онтології начального матеріалу навчальної дисципліни (рис. 1). Така формалізація досліджуваного процесу визначає структуру моделі онтології начального матеріалу.

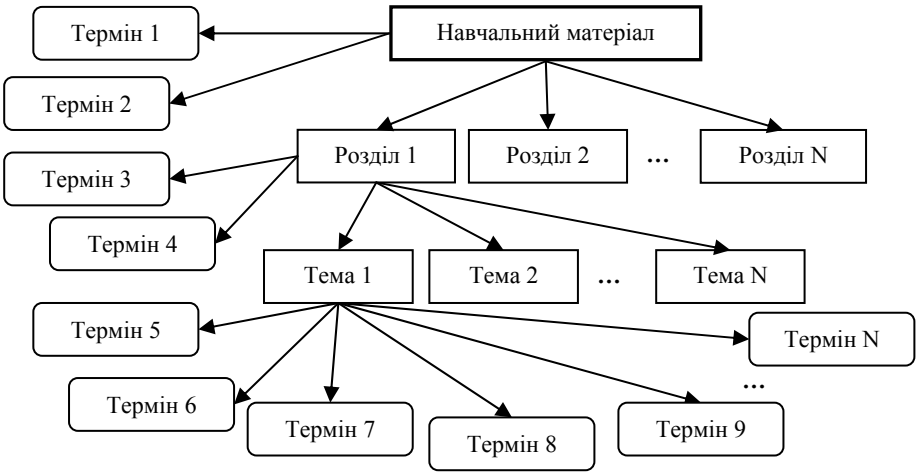


Рис. 1. Вихідна модель онтології навчального матеріалу

Відповідно до наведеного, по відношенню до предметної області навчального матеріалу онтологія приймає наступний вигляд:

- Ключові (важливі) слова є екземплярами, що складають нижній рівень онтології.
- Ключові терміни (словосполучення, коллокації, складні слова, абревіатури) є поняттями, впорядкованими множинами з 1..N ключових слів.
- Змістова структура навчальних матеріалів визначає ієрархію понять.
- Атрибути є властивостями об'єктів онтології й містять назву, вагову оцінку, тип, прив'язку до елементу структури тощо.

При цьому ієрархія змістовних блоків, що формує верхній рівень онтології навчального матеріалу, може мати довільну кількість рівнів (наприклад: Дисципліна / Модуль / Розділ / Тема / Лекція / Параграф). Множини ключових термінів кожного елементу ієрархії змістовних блоків навчального матеріалу можуть мати довільну кількість елементів (можливе включення будь-якого слова, що хоча б один раз згадується в контенті) й у сукупності формують загальну множину ключових термінів навчального матеріалу (рис. 2). Зв'язок елементів множини ключових термінів навчального матеріалу та елементів ієрархії змістовних блоків навчального матеріалу не є парним (один термін може бути важливим в кількох різних фрагментах навчального матеріалу).

Із змістовної точки зору ключовою властивістю контенту навчального матеріалу є його семантика, яку формалізовано відображають у вигляді семантичної мережі, вузлами якої є терміни, що несуть смислове навантаження, а дуги відображають характер зв'язку між вузлами [10]. Проте зв'язок між термінами навчальних матеріалів залежить від багатьох факторів (галузь знань, тип лекції, літературні здібності автора, тощо) й може змінюватися у широких межах без втрати якості викладання, що знижує актуальність його аналізу. Тому, хоча в моделі онтології навчального матеріалу горизонтальні зв'язки (зв'язки між термінами) не відкидаються, з точки зору вирішення прикладних задач їх наявність не є обов'язковою.

Відповідно до особливостей конкретних цілей застосування, модель онтології навчального матеріалу може бути доповненою як кількісно (збільшення рівнів структури чи загальної кількості актуальних термінів), так і структурно.

Прикладом структурної модифікації є співставлення навчального матеріалу тестовим завданням, що реалізується шляхом їх співставлення елементам структури навчального матеріалу – онтології навчального матеріалу. При цьому співставлення проводиться не з власне елементами структури онтології, а з ключовими термінами (поняття, визначення) в рамках структури навчального матеріалу. В результаті такого співставлення виникає новий рівень онтології (тестові завдання), формуючи повну онтологію тесту [11]

навчального матеріалу (рис. 3). Однак за всіх випадків модифікації, вихідна модель концептуально буде залишатись незмінною.

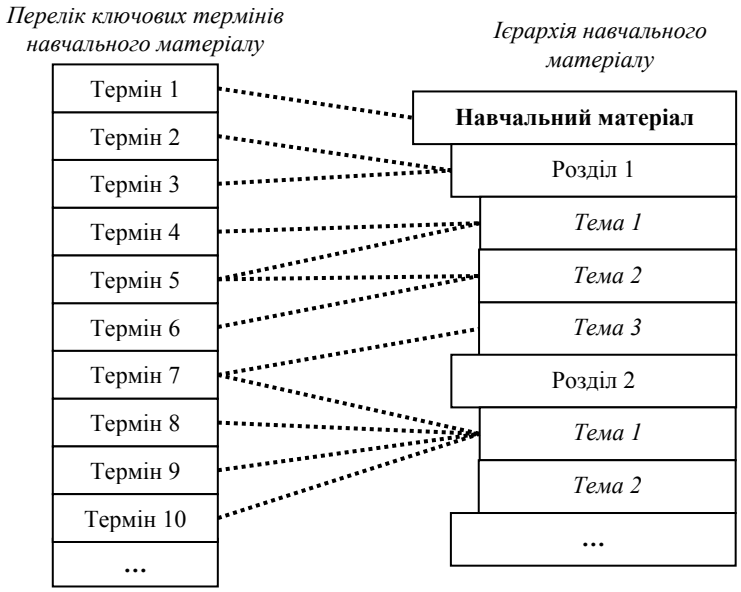


Рис. 2. Зв'язок елементів моделі онтології навчального матеріалу

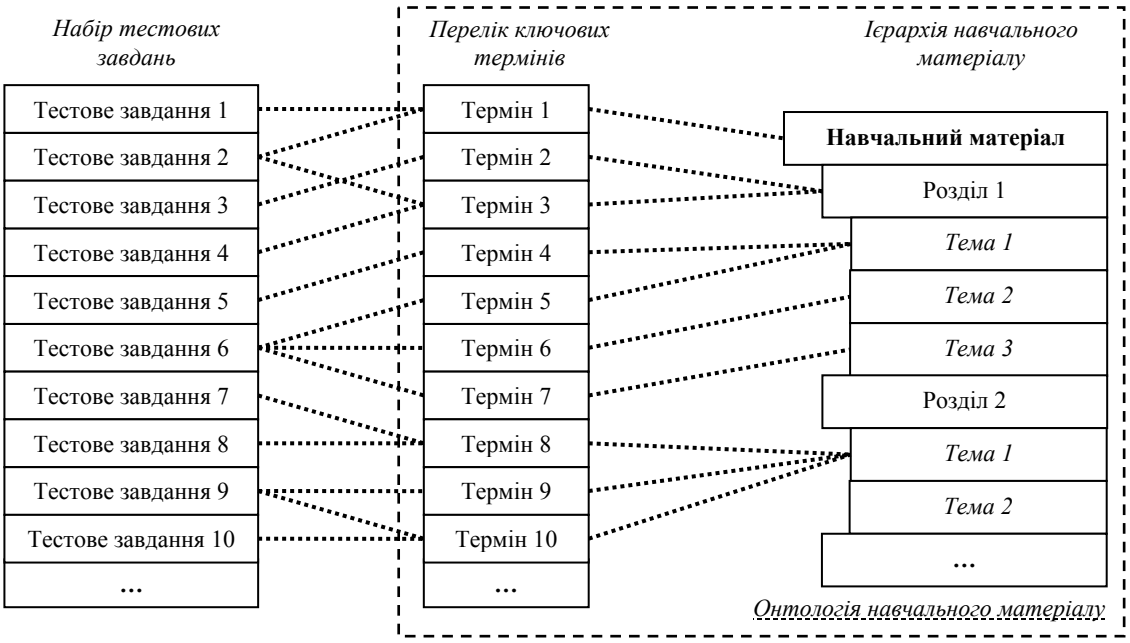


Рис. 3. Модифікація для тестів моделі онтології навчального матеріалу

Таким чином, модель онтології навчального матеріалу складається з ключових слів, ключових термінів, структури навчального матеріалу, атрибутів ключових слів та ключових термінів, що визначають їх властивості та забезпечують прив'язку до елементів структури навчального матеріалу. За такої моделі, онтологія навчального матеріалу може бути методом виявлення сенсу навчального матеріалу та засобом вирішення різноманітних практичних задач щодо сенсу навчальних матеріалів.

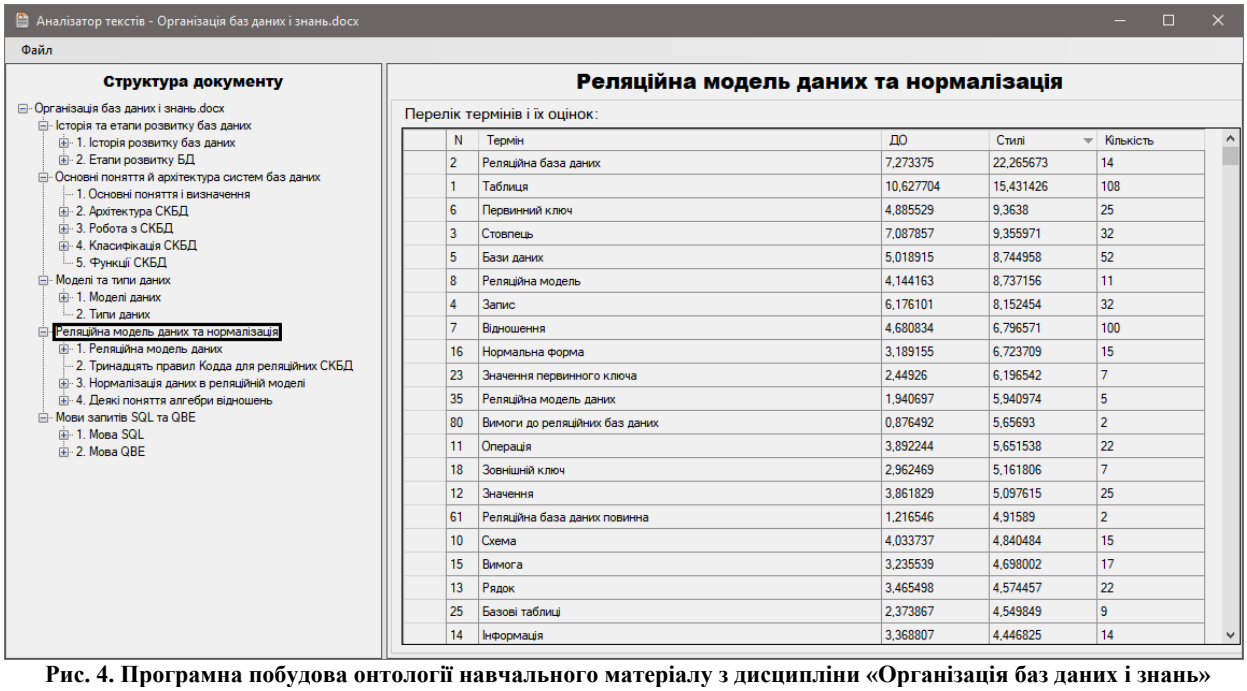
Програмна реалізація

З огляду на існуючі загальноприйняті вимоги до структури навчальних матеріалів навчальних дисциплін (наприклад: Дисципліна / Розділ / Тема), яка відображає семантичну структуру навчального матеріалу, навчальні матеріали як електронні документи відбивають відповідну онтологію своєю структурою. Стилістичні вимоги до оформлення електронних документів навчальних матеріалів вимагають використання для цього спеціальних стилів (наприклад, назви дисциплін відповідатимуть елементам стндартного стилю «Заголовок 1», назви розділів – «Заголовок 2», назви тем – «Заголовок 3» тощо). Таким чином, структура цифрових документів навчальних матеріалів регламентується мовами розмітки цифрових документів (наприклад, WordprocessingML [12] для XML) й реалізується через систему заголовків. Це визначає можливим програмну побудову структури навчального матеріалу як елементу онтології

навчального матеріалу шляхом аналізу стилів, що використовуються в цифровому документі. Контент елементів структури обмежує область присутності й актуальності ключових термінів.

Формування множини термінів проводиться за кілька етапів. Спершу виконується пошук важливих слів з використанням методу дисперсійного оцінювання, який показав свою достатню ефективність у рамках попередніх досліджень [13]. Словосполучення ж є стійкими сукупностями важливих слів, що згруповані у визначеній послідовності та у такій комбінації неодноразово присутні в розглядуваному контенті. Тому для формування множини словосполучень проводиться пошук неперервних скупчень ключових слів в тексті й знайдені зразки додаються у множину словосполучень. Отримана множина словосполучень сортується за частотою вживання, після чого з неї видаляються неключові словосполучення – такі, що зустрічаються в тексті один раз, або не містять двох і більше іменників чи прикметників. На основі отриманих даних проводиться формування вихідної множини термінів. Інтеграція множини ключових слів та множини ключових словосполучень відбувається шляхом заміщення словосполученнями слів, які є переважно елементами відповідних словосполучень. Наслідком цього етапу є об'єднана вихідна множина термінів. Об'єднана множина термінів компактифікується шляхом видалення повторів серед її елементів і сортується за значеннями їх дисперсійної оцінки. В результаті формується решта елементів онтології навчального матеріалу.

Запропонована модель була реалізована в тестовому програмному продукті (рис. 4). Вхідними даними для системи є цифровий документ навчального матеріалу.



N	Термін	ДО	Стилі	Кількість
2	Реляційна база даних	7,273375	22,265673	14
1	Таблиця	10,627704	15,431426	108
6	Первинний ключ	4,885529	9,3638	25
3	Стовпець	7,087857	9,355971	32
5	Бази даних	5,018915	8,744958	52
8	Реляційна модель	4,144163	8,737156	11
4	Запис	6,176101	8,152454	32
7	Відношення	4,680834	6,796571	100
16	Нормальна форма	3,189155	6,723709	15
23	Значення первинного ключа	2,44926	6,196542	7
35	Реляційна модель даних	1,940697	5,940974	5
80	Вимоги до реляційних баз даних	0,876492	5,65693	2
11	Операція	3,892244	5,651538	22
18	Зовнішній ключ	2,962469	5,161806	7
12	Значення	3,861829	5,097615	25
61	Реляційна база даних повинна	1,216546	4,91589	2
10	Схема	4,033737	4,840484	15
15	Вимога	3,235539	4,698002	17
13	Рядок	3,465498	4,574457	22
25	Базові таблиці	2,373867	4,549849	9
14	Інформація	3,368807	4,446825	14

Рис. 4. Програмна побудова онтології навчального матеріалу з дисципліни «Організація баз даних і знань»

В результаті визначення структури та побудови впорядкованих множин ключових термінів формується повна онтологія навчального матеріалу. Одержана повна онтологія навчального матеріалу, що є вихідними даними системи, відображає семантичну структуру навчального матеріалу, при цьому нижній рівень онтології (ключові терміни) є областю вивчення в межах навчального матеріалу.

Із застосування запропонованої моделі онтології навчального матеріалу було розв'язано ряд практичних задач – оцінка відповідності навчальних матеріалів вимогам [14], оцінка відповідності наборів тестових завдань навчальним матеріалам [15], автоматизована генерація прототипів тестових завдань [16], реалізація гнучких алгоритмів тестування [11], автоматизація формування рефератів та анотацій до елементів навчальних матеріалів [17] та інші. При цьому встановлено, що онтологія навчального матеріалу розглянутої моделі може бути методом виявлення сенсу навчального матеріалу й ефективно використана в розробці інформаційних технологій для роботи з навчальними матеріалами.

Висновки

В статті було досліджено проблему застосування онтології як методу формального опису знань, що містяться в навчальних матеріалах. Запропоновано модель онтології навчального матеріалу, що складається з ключових слів, ключових термінів, структури навчального матеріалу, атрибутів ключових слів та ключових термінів, що визначають їх властивості та забезпечують прив'язку до елементів структури навчального матеріалу. За такої моделі, онтологія навчального матеріалу може бути методом виявлення сенсу навчального матеріалу та засобом вирішення ряду практичних задач щодо сенсу навчальних матеріалів.

Описано тестовий програмний продукт, що дозволяє автоматизовану побудову онтології навчального матеріалу за даною моделлю. Розглянуто практичні задачі, що можуть бути вирішені шляхом

застосування запропонованої моделі онтології навчального матеріалу. Подальші дослідження спрямовані на визначення ефективності застосування запропонованої моделі онтології навчального матеріалу для вирішення наведених практичних задач.

Література

1. Нові інформаційні технології в освіті [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://it-tehnolog.com/statti/novi-informatsiyni-tehnologiyi-navchannya/.

2. Кліменко В. І. Аналіз сучасних методів генерації тестових завдань / В. І. Кліменко, О. В. Мазурець // Збірник наукових праць за матеріалами десятої міжнародної науково-технічної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних технологій 2016». – Хмельницький, 2016. – С. 77–84.

3. Снитюк В. Е. Интеллектуальное управление оцениванием знаний / В. Е. Снитюк, К. Н. Юрченко. − Черкассы, 2013. − 262 с.

4. Титенко С. В. Практична реалізація технології автоматизації тестування на основі понятійно-тезисної моделі / С. В. Титенко, А. А. Гагарін [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.setlab.net/?view=Tytenko_Virt06

5. Титенко С. В. Генерація тестових завдань у системі дистанційного навчання на основі моделі формалізації дидактичного тексту / С. В. Титенко // Наукові вісті НТУУ "КПІ" – 2009. – № 4. – С. 47–57.

6. Мельник А. М. Метод генерації тестових завдань на основі системи семантичних класів / А. М. Мельник, Р. М. Пасічник // Вісник ТДТУ. − 2010. − Том 15. − № 1. − С. 187–193.

7. Лапшин В. А. Онтологии в компьютерных системах / В. А. Лапшин. − М. : Научный мир, 2010. − 224 с.

8. Gruber T. R. The role of common ontology in achieving sharable, reusable knowledge bases / T. R. Gruber // Principles of Knowledge Representation and Reasoning. Proceedings of the Second International Conference. J. A. Allen, R. Fikes, E. Sandewell – eds. Morgan Kaufmann, 1991, 601–602.

9. Роль онтологій в сучасній комп'ютерній науці [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://rsdn.org/article/philosophy/what-is-onto.xml

10. Марка Д. Методология структурного анализа и проектирования / Давид Марка, Клемент МакГоуэн ; пер. с англ. – М., 1993. – 240 с.

11. Бармак О. В. Застосування інформаційної технології гнучкого тестування рівня знань у середовищі Moodle / О. В. Бармак, О. В. Мазурець, А. О. Матвійчук // Вісник Хмельницького національного університету, серія: технічні науки. – 2017. – № 3. – С. 103–115.

12. DocX for creates or modifies Microsoft Word files [Електронний ресурс]. − Режим доступу : https://github.com/xceedsoftware/DocX

13. Бармак О. В. Інформаційна технологія автоматизованого визначення термінів у навчальних матеріалах / О. В. Бармак, О. В. Мазурець // Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». – Хмельницький, 2015. – № 2. – С. 94–102.

14. Коренчук О. В. Система інтелектуального аналізу відповідності лекційних матеріалів навчальних дисциплін стандартам освіти / О. В. Коренчук, О. В. Мазурець // Збірник наукових праць за матеріалами восьмої міжнародної науково-технічної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних технологій 2014». – Хмельницький, 2014. – С. 191–201.

15. Поліщук А. О. Інформаційна технологія автоматизації аналізу відповідності тестових завдань лекційним матеріалам навчальних дисциплін / А. О. Поліщук, О. В. Мазурець // Збірник наукових праць за матеріалами дев'ятої міжнародної науково-технічної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних технологій 2015». – Хмельницький, 2015. – С. 207–218.

16. Бармак О. В. Інформаційна технологія автоматизованого формування тестових завдань / О. В. Бармак, О. В. Мазурець, В. І. Кліменко // Вісник Хмельницького національного університету, серія: технічні науки. – 2017. – № 5. – С. 93–103.

17. Бармак О. В. Інформаційна технологія автоматизованого анотування та реферування цифрових текстів / О. В. Бармак, О. В. Мазурець, А. В. Живілік // Вісник Хмельницького національного університету, серія: технічні науки. – 2017. – № 4. – С. 147–158.

References

1. Novi informatsiini tekhnolohii v osviti. URL: http://it-tehnolog.com/statti/novi-informatsiyni-tehnologiyi-navchannya/.

2. Klimenko V. I. Analiz suchasnykh metodiv heneratsii testovykh zavdan / V. I. Klimenko, O. V. Mazurets // Zbirnyk naukovykh prats za materialamy desiatoi mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Aktualni problemy kompiuternykh tekhnolohii 2016». – Khmelnytskyi, 2016. – S. 77–84.

3. Snytiuk V. E. Yntellektualnoe upravlenye otsenyvanyem znanyi / V. E. Snytiuk, K. N. Yurchenko. − Cherkassы, 2013. − 262 s.

4. Tytenko S. V. Praktychna realizatsiia tekhnolohii avtomatyzatsii testuvannia na osnovi poniatiino-tezysnoi modeli / S. V. Tytenko, A. A. Haharin. URL: http://www.setlab.net/?view=Tytenko_Virt06

5. Tytenko S. V. Heneratsiia testovykh zavdan u systemi dystantsiinoho navchannia na osnovi modeli formalizatsii dydaktychnoho tekstu / S. V. Tytenko // Naukovi visti NTUU "KPI" – 2009. – 4. – S. 47–57.

6. Melnyk A. M. Metod heneratsii testovykh zavdan na osnovi systemy semantychnykh klasiv / A. M. Melnyk, R. M. Pasichnyk // Visnyk TDTU. − 2010. − Tom 15. − 1. − S. 187–193.

7. Lapshyn V. A. Ontolohyy v kompiuternykh systemakh / V. A. Lapshyn. − M. : Nauchnyi myr, 2010. − 224 s.

8. Gruber T. R. The role of common ontology in achieving sharable, reusable knowledge bases / T. R. Gruber // Principles of Knowledge Representation and Reasoning. Proceedings of the Second International Conference. J. A. Allen, R. Fikes, E. Sandewell – eds. Morgan Kaufmann, 1991, 601–602.

9. Rol ontolohii v suchasnii kompiuternii nautsi. URL: https://rsdn.org/article/philosophy/what-is-onto.xml

10. Marka D. Metodolohyia strukturnoho analyza y proektyrovanyia / Davyd Marka, Klement MakHouen ; per. s anhl. – M., 1993. – 240 s.

11. Barmak O. V. Zastosuvannia informatsiinoi tekhnolohii hnuchkoho testuvannia rivnia znan u seredovyshchi Moodle / O. V. Barmak, O. V. Mazurets, A. O. Matviichuk // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2017. – Issue 3. – S. 103–115.

12. DocX for creates or modifies Microsoft Word files. URL: https://github.com/xceedsoftware/DocX

13. Barmak O. V. Informatsiina tekhnolohiia avtomatyzovanoho vyznachennia terminiv u navchalnykh materialakh / O. V. Barmak, O. V. Mazurets // Mizhnarodnyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal «Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh». – Khmelnytskyi, 2015. – # 2. – C. 94–102.

14. Korenchuk O. V. Systema intelektualnoho analizu vidpovidnosti lektsiinykh materialiv navchalnykh dystsyplin standartam osvity / O. V. Korenchuk, O. V. Mazurets // Zbirnyk naukovykh prats za materialamy vosmoi mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Aktualni problemy kompiuternykh tekhnolohii 2014». – Khmelnytskyi, 2014. – S. 191–201.

15. Polishchuk A. O. Informatsiina tekhnolohiia avtomatyzatsii analizu vidpovidnosti testovykh zavdan lektsiinym materialam navchalnykh dystsyplin / A. O. Polishchuk, O. V. Mazurets // Zbirnyk naukovykh prats za materialamy deviatoi mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Aktualni problemy kompiuternykh tekhnolohii 2015». – Khmelnytskyi, 2015. – S. 207–218.

16. Barmak O. V. Informatsiina tekhnolohiia avtomatyzovanoho formuvannia testovykh zavdan / O. V. Barmak, O. V. Mazurets, V. I. Klimenko // Herald of Khmelnytskyi National University.. – 2017. – Issue 5. – S. 93–103.

17. Barmak O. V. Informatsiina tekhnolohiia avtomatyzovanoho anotuvannia ta referuvannia tsyfrovykh tekstiv / O. V. Barmak, O. V. Mazurets, A. V. Zhyvilik // Herald of Khmelnytskyi National University.. – 2017. – Issue 4. – S. 147–158.

Рецензія/Peer review : 30.11.2017 р. Надрукована/Printed :07.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Сорокатий Р.В.

ТЕХНОЛОГІЇ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 687.016.5:572.087

О.П. СИРОТЕНКО, С.М. ШЕВЧУК
Хмельницький національний університет

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕСКІЗНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ЖІНОЧИХ СУКОНЬ ЗА МОТИВАМИ СТИЛЮ МОДЕРН

Розроблено графічні моделі типових конструктивно-композиційних рішень жіночих суконь стилю модерн та визначено їх пропорційну будову. Розроблено комбінаторні групи типових моделей сучасних жіночих суконь, стилізованих за мотивами стилю модерн. Визначено основні прийоми стилізації конструктивно-декоративних ознак жіночих суконь відповідно до актуальних тенденцій моди. Розроблено маршрути зміни композиційних ознак ретро суконь в сучасні ознаки. Удосконалено спосіб розробки ескізного проекту моделей жіночого одягу за мотивами стилю модерн.

Ключові слова: стиль модерн, конструктивно-декоративні ознаки, прийоми стилізації, комбінаторні групи, базові моделі, моделі-модифікації.

O. P. SYROTENKO, S. M. SHEVCHUK
Khmelnytsky National University

IMPROVEMENT OF THE PROCESS OF SKETCH DESIGN OF WOMEN'S DRESSES ON THE MOTIVES OF THE ART NOUVEAU STYLE

The article deals with the issues of improving the method of designing a sketch model of women's clothing based on the art nouveau style, as one of the sources of creativity that are of current interest today. The compositional structure of women's outfits of art nouveau style is analyzed. Graphic rows of their typical constructive and composite solutions are developed. Proportional relations of their forms parts were calculated. Modern designs of dresses, which had the features of the art nouveau style, were selected out from the collections of renowned clothing designers. Based on the analysis of their constructive and composite features, graphic models of typical design solutions have been developed as well as their proportions calculated. By defining the uniformity of compositional features of modern dresses, basic and modified models of their typical forms, which were styled on the motives of art nouveau, have been developed. They are combined into four combinatorial groups for the silhouette of the product, the cut and the shape of the sleeve. By analogy to the retro-analogues, modern outfits, which have had similar design, texture, color, fabric pattern, and decoration, have been selected. An analysis of the principles of their styling allowed development of the ways of changing the compositional features of retro dresses into the modern features. Improvement of the method of sketch design of modern dresses on the motives of the art nouveau style lies in the development of a graphic model of the retro-analogue as well as in the selection of a graphic model of modern form from combinatorial groups of typical designs, which were developed by the authors. Several variants of basic graphic form modifications were developed. Through the geometric transformations of the components of the form modifications, model rows of different types of constructions are to be designed. The developed system of typical constructive and composite solutions of art nouveau style outfits allows creating a large variation range of input graphic models of retro-analogues by using the method of combinatorial synthesis. Development of the designs modifications, which are based on these models, and in accordance with current trends of fashion, allows obtaining a wide range of new perspective clothing designs. All above-mentioned steps of sketch designing can be adapted in order to use them in clothing design systems and in this way can provide significant time saving of design process.

Keywords: art Nouveau style, constructive and composite features, styling techniques, typical models of modern clothes, retro-analogues combinatorial synthesis.

Вступ

Сьогодні актуальним є зростаючий інтерес як на професійному, так і на споживчому рівні сприйняття, до модних тенденцій у використанні мотивів стилю модерн, та їх реалізації в колекціях провідних Будинків моди. Сьогодні вплив ретро мотивів на модні тенденції особливо значний, оскільки сучасна мода, так чи інакше, використовує елементи стилів минулого. Відповідно кожен рік спостерігається старання брендів наділити ретро образи сучасними рисами.

При розробці авторських моделей одягу за мотивами ретро стилю вихідною інформацією є характерні риси одягу того періоду, які, відповідно до актуальних сьогодні тенденцій моди, творчо трансформуються дизайнерами. При цьому важливим є не лише визначення ознак джерела творчості, але й шляхів та способів його стилізації відповідно до сучасних тенденцій моди та ступінь узгодження рис ретро стилю з рисами сучасного одягу. Ступінь стилізації ознак ретро стилю та його адаптація до сучасних тенденцій моди залежить від рівня творчої креативності дизайнера та його вміння адаптувати риси минулого до рис сучасності. Адже головне завдання при проектуванні сучасного одягу полягає не в тому, щоб стилістично копіювати деталі суконь модерну, а ґрунтуючись на їх беззастережних перевагах, розвивати перспективні модні тенденції і сприяти розвитку індустрії моди, розширенню ринку модного одягу, застосовуючи нові форми, пропорції та технологію оздоблення виробу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дослідження, присвячені костюму модерну, переважно мають мистецтвознавчий характер та узагальнено розглядають період початку XX сторіччя. Інформаційні матеріали, зазначені в літературних джерелах, що стосуються історії костюму та моди [1–3] дозволяють визначити характерні ознаки конструкції та композиції одягу цього періоду. Однак, питання їх стилізації відповідно до сучасних тенденцій моди залишається не дослідженим. Вивчення цих особливостей дозволить виконати

композиційну трансформацію та перетворення елементів ретро стилю в елементи сучасного одягу та прискорить процес їх аналізу та вибору, при формуванні характерних ознак джерела творчості.

Мета та завдання дослідження

З метою скорочення часу на розробку ескізних проектів авторських колекцій та одиничних моделей одягу за мотивами стилю модерн, а також введення та адаптацію характерних ознак стилю модерн в дизайн сучасного костюма необхідно здійснити аналіз та систематизацію цих ознак і дослідити шляхи їх стилізації відповідно до сучасних тенденцій моди.

Виклад основного матеріалу

Для дослідження конструктивно-декоративних ознак жіночих суконь, характерних пізньому періоду стилю модерн, було розглянуто журнали мод «Весникь Моды» [4] за 1909–1914 роки, перекладені з паризьких журналів «Le Moniter de la Mode», «La Mode illustree». Визначено, що найбільш характерними композиційними ознаками цих суконь є силует та довжина виробу; рівень лінії талії; крій, довжина та об'єм рукава на лінії обхвату плеча, ліктя та зап'ястку; форма та глибина горловини; наявність баски або декількох шарів верхньої спідниці, довжина та форма лінії низу баски та кожного шару спідниці.

Для визначення характерних ознак форми жіночих суконь було виконано графічний аналіз їхніх просторових структур [5] та розроблено зведену модель формоутворення одягу пізнього періоду стилю модерн у вигляді форм-символів, які були розташовані в хронологічному порядку (рис. 1).

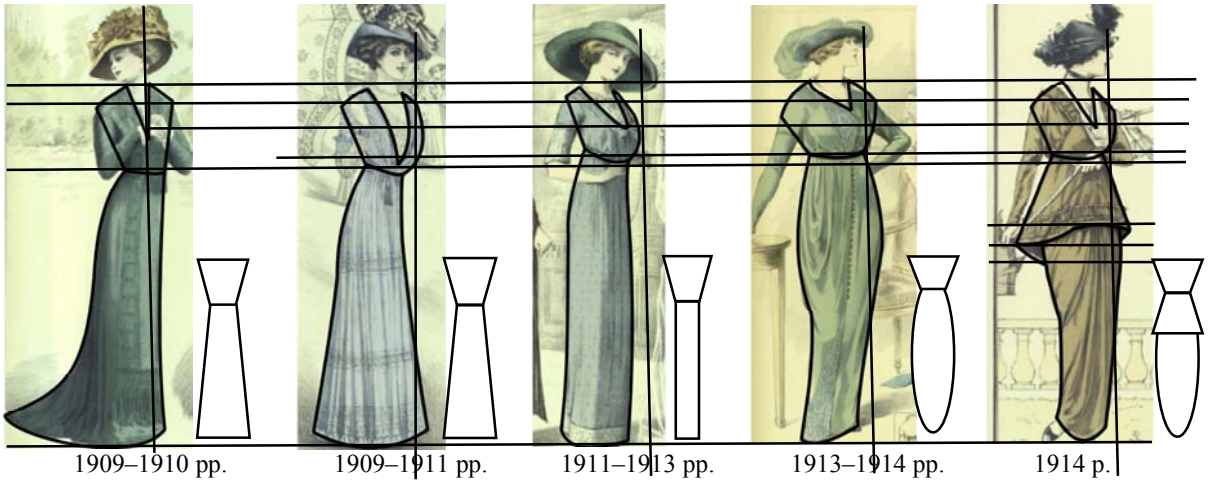


Рис. 1. Зведена модель формоутворення суконь пізнього періоду стилю модерн

Дослідження розмірів, об'єму та місця розташування конструктивно-декоративних ознак суконь дозволило розробити графічні моделі їхніх типових рішень та визначити пропорційні співвідношення [6] складових елементів конструкції (рис. 2). Встановлено, що для стилю модерн були характерними рукави малого та середнього об'єму, ліф – малого або середнього об'єму, спідниці – середнього об'єму з помірним розширенням або звуженням по лінії низу. Найбільш характерними були пропорційні співвідношення довжини ліфу до довжини спідниці, положення лінії талії сукні відносно природного рівня талії фігури (рис. 2, а), співвідношення глибини горловини до довжини ліфу та довжини баски до довжини спідниці (рис. 2, б), довжини рукава до довжини руки та довжини верхньої спідниці до загальної довжини спідниці (рис. 2, а); (рис. 3, в). Їх числова характеристика представлена на рис. 2.

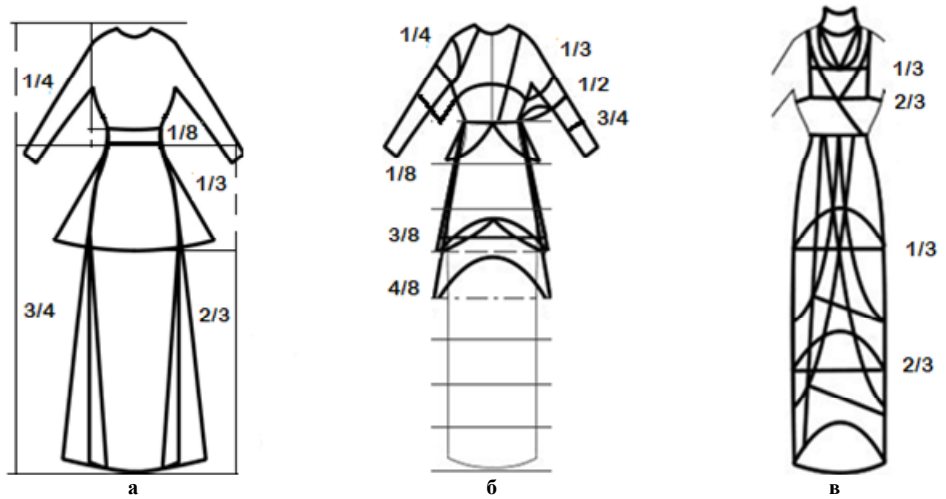
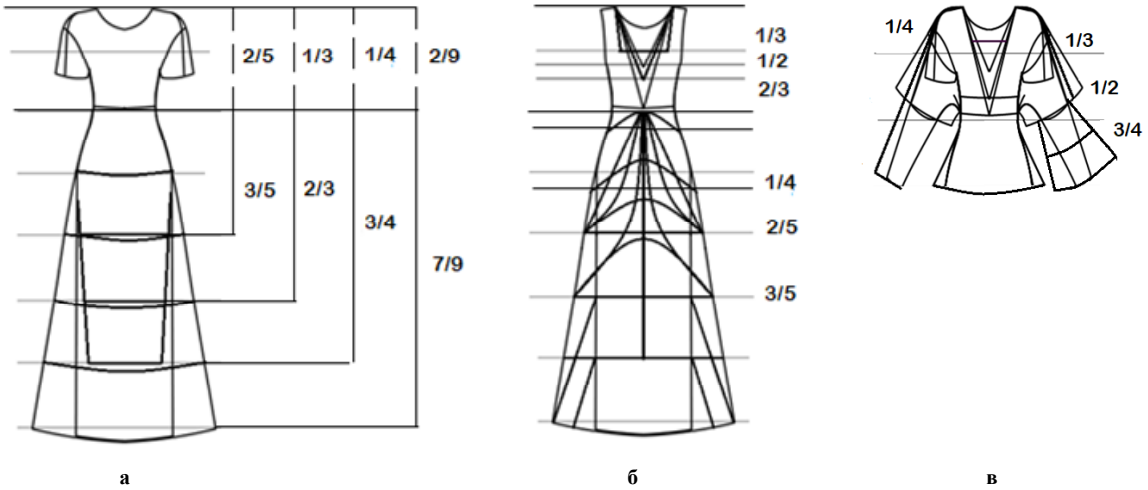


Рис. 2. Графічні моделі типових конструктивно-композиційних ознак жіночих суконь пізнього періоду стилю модерн: а) силуету та рівня лінії талії; б) крою рукава та басок; в) форми горловин та крою шарів верхньої спідниці

Для визначення актуальних конструктивно-декоративних ознак сучасних жіночих суконь, розроблених за мотивами стилю модерн, були розглянуті колекції провідних дизайнерів 2016-2017 рр. [6, 7]. Серед них за аналогією силуету, пропорцій, конструкції стану, спідниці та рукава з характерними ознаками стилю модерн виділено 144 моделі. Аналіз їхніх конструктивно-декоративних ознак вказує на те, що в сучасних моделях збережені загальні риси та пропорції, характерні стилю модерн, але вони набули нових рис у відповідності до сучасного напрямку моди. Окремі з ознак не зустрічаються в сучасних моделях (S-подібний силует, форма горловини подвійне каре). Поряд з цим, з'явилися нові групи пропорцій: наприклад, довжини спідниці до довжини ліфу 2/3, 1/2, 1/4, 2/7; довжини баски або верхнього шару спідниці до загальної довжини спідниці: 1/4, 2/5, 3/5 (рис. 3). Це пояснюється широкою варіацією довжин сучасних виробів та зміною рівнів розташування головних композиційних акцентів. Сьогодні спостерігається збільшення об'ємів у нижній частині виробу та рукава при збереженні малих та середніх об'ємів на інших ділянках виробу.



а **б** **в**

Рис. 3. Графічні моделі типових конструктивно-композиційних ознак сучасних жіночих суконь стилізованих у стилі модерн: а) силуету та рівня лінії талії; б) форми горловин та крою шарів спідниці; в) крою рукава

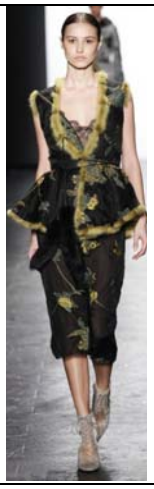
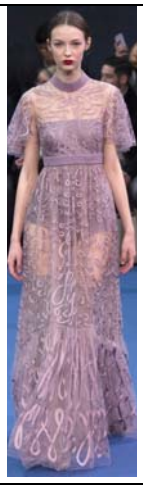
Рис. 4. Комбінаторні групи стилізованих моделей жіночих суконь створених за мотивами стилю модерн

Для опису сучасних моделей за ознаками форми та конструкції кожна із ознак була закодована двозначним кодом: перша цифра – вид композиційної ознаки, друга – її різновид. Аналіз їх однотипності за силуетом, рівнем лінії талії, кроєм, довжиною та об'ємом рукава, а також формою та глибиною горловини, довжиною баски та кількістю шарів спідниці дозволив розробити систему базових та модифікованих моделей. Базові характеризуються типовими ознаками конструкції, з частотою зустрічності 45%–75%, модифіковані – ознаками з частотою зустрічності 25%–45% [8]. Базові та близькі до них за силуетом, довжиною виробу, рівнем лінії талії, кроєм та об'ємом рукава модифіковані моделі були об'єднані в 4 комбінаторні групи (рис. 4).

Для визначення характеру зміни, композиційно-конструктивних ознак стилю модерн при сучасній їх стилізації були підібрані 44 пари сучасних моделей одягу та їх аналогів із суконь періоду модерн. Їх аналіз вказав, що сучасними дизайнерами використовуються класичні методи стилізації: тотожності, асоціацій, цитат, спрощення або посилення, оновлення, еклектики [9]. При цьому використовуються наступні прийоми трансформації ознак джерела творчості в моделі сучасного одягу (табл. 2): 1) тотожне відтворення крою при нюансі тканин та оздоблення; 2) нюанс крою при тотожному відтворенні тканин та оздоблення; 3) перенесення традиційних способів оздоблення на нові матеріали; 4) вихоплювання фрагменту з цілого і перенесення його в нову форму, комплекс; 5) використання декору на тих же конструктивних поясах, що і в першоджерелі; 6) традиційне розміщення декору при іншому силуетному вирішенні виробу; 7) цитування традиційних ретро орнаментів на новій формі; 8) спрощення крою та оздоблення при збереженні впізнаваності стилю; 9) виявлення типових рис першоджерела; поєднання декількох визначених властивостей і посилення чи послаблення окремих з них; 10) застосування модного на час створення силуету одягу із збереженням характерного оздоблення та кольору матеріалу; 11) зміна пропорційних членувань форми з урахуванням актуальних тенденцій моди; 12) зміна технік декорування вбрання; 13) збільшення або зменшення орнаментального мотиву, характерного для історичного одягу та його повтори на інших деталях костюму зі змінами пропорцій та кольорів. Окремі з них представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристика принципів стилізації, що використовуються при створенні сучасних жіночих суконь за мотивами стилю модерн (фрагмент)

Принципи стилізації							
1) тотожне відтворення крою при нюансі тканин та оздоблення		2) нюанс крою при тотожному відтворенні тканин та оздоблення		3) перенесення традиційних способів оздоблення на нові матеріали		4) вихоплювання фрагменту з цілого і перенесення його в нову форму, комплекс	
Модель-аналог	Сучасна сукня	Модель-аналог	Сучасна сукня	Модель-аналог	Сучасна сукня	Модель-аналог	Сучасна сукня
1912 р.	Luisa Beccaria 2016	1913 р.	Dennis Basso 2016	1910 р.	Roksanda 2016	1910-1911 рр.	Monique Lhuillier 2016
							

На основі аналізу принципів стилізації сучасних суконь за мотивами пізнього періоду стилю модерн, складена схема маршруту можливих переходів від сукні-аналога до сучасної сукні (рис. 5). Вона дозволяє виконувати видозміну основних конструктивно-композиційних елементів моделі-аналогу в модель-ідею на засадах гармонізації.

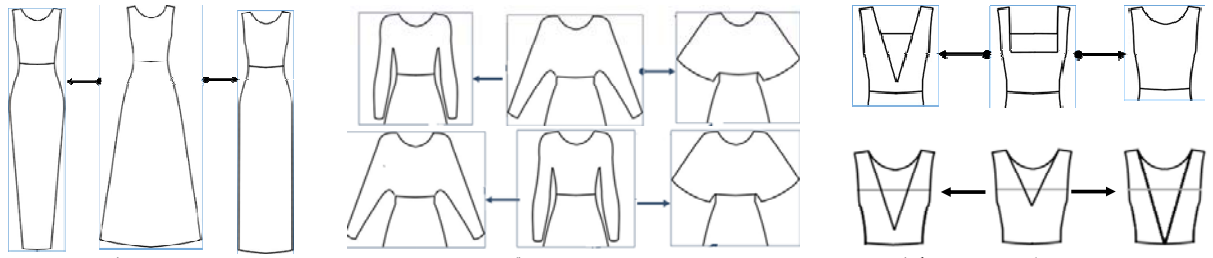


Рис. 5. Схема маршруту зміни конструктивних ознак суконь-аналогів при сучасній стилізації

Сформована база даних комбінаторних груп сучасних типових моделей та варіацій видозміни їхніх конструктивно-композиційних ознак за схемами маршрутів дозволяє виконувати ескізну проробку нових моделей одягу в п’ять етапів.

Першим етапом є вибір ознак форми [10] образної системи ретро аналога. Їх визначають в наступній послідовності: форма силуету → довжина виробу → рівень лінії талії → крій та довжина рукава → форма рукава → форма та глибина горловини → довжина, об’єм баски та верхніх шарів спідниці → форма лінії низу баски та верхніх шарів спідниці → формування зведеної моделі ретро аналога. Приклад вибору ознак форми образної системи сукні-аналога періоду пізнього модерну представлений на рис. 6. Вона може містити ознаки як однієї, так і декількох моделей-аналогів.

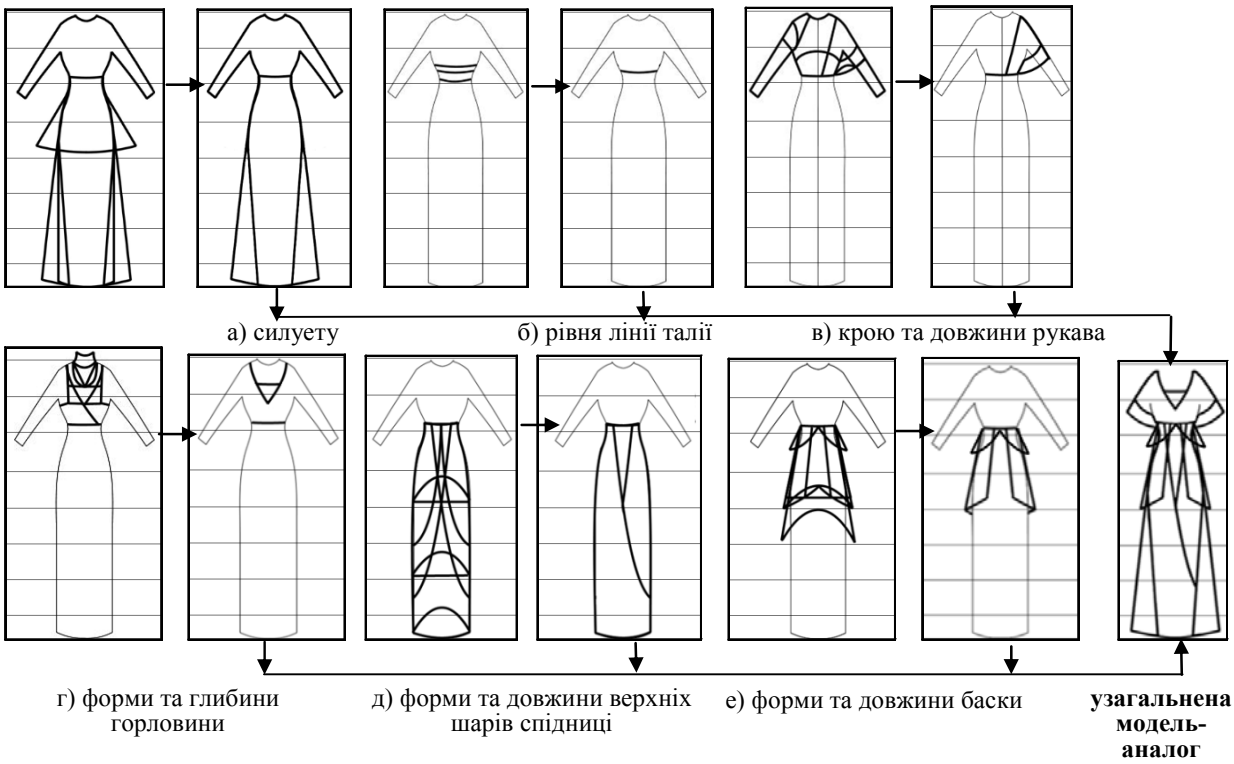


Рис. 6. Етап вибору ознак форми образної системи моделі ретро аналога

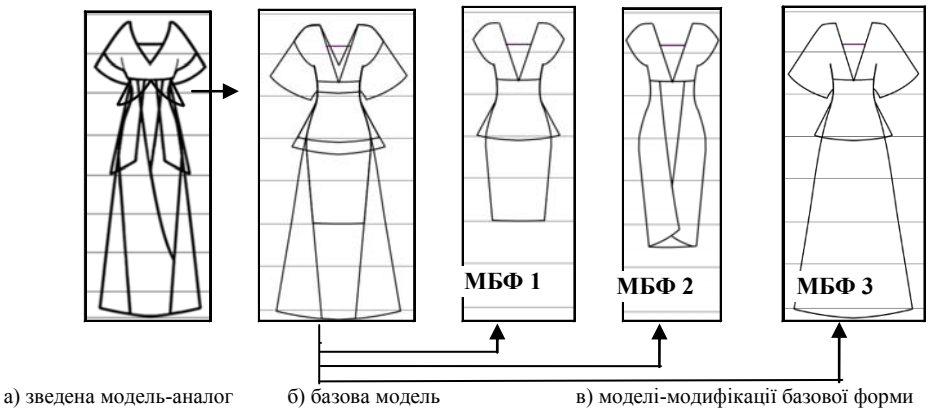


Рис. 7. Етап розробки геометричних модифікацій базової форми

Другим етапом є вибір базової моделі із системи комбінаторних груп сучасних жіночих суконь та розробка на їх основі системи модифікацій базової форми. В якості базової обирають модель, яка за

основними ознаками має найбільшу ступінь схожості зі зведеною моделлю-аналогом. Модифікаціями базової форми (МБФ) є моделі, створені за принципом поєднання окремих ознак базової моделі (рис. 7). Вони можуть характеризуватися єдиною або подібною формою силуету, наявністю додаткових структурних елементів форми для забезпечення її розвитку від найпростішого до найскладнішого геометричного виду.

Третім етапом є розробка модифікацій форми. На цьому етапі використовуються прийоми геометричних перетворень [11]: розтяг, стиск, зсув, злом контурних ліній складових частин форми. На цьому етапі враховують маршрути зміни форми та пропорцій сучасних моделей в результаті їх стилізації (див. рис. 5).

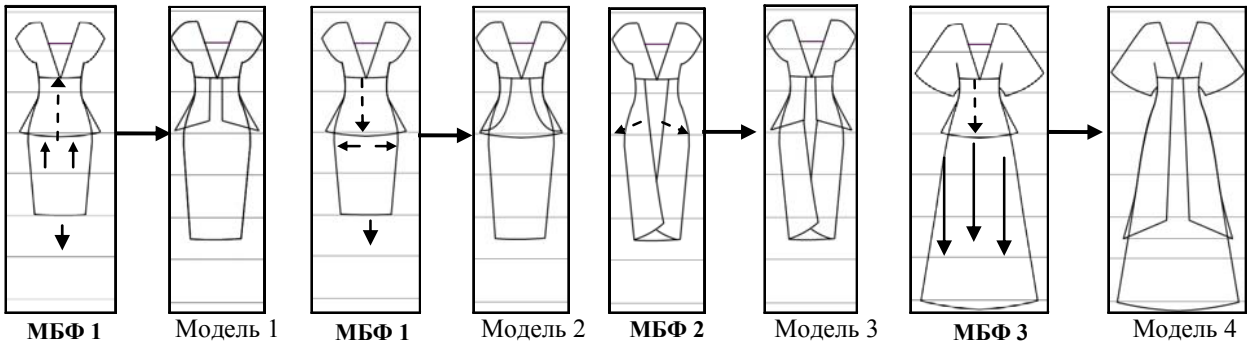


Рис. 8. Етап розробки модифікацій конструкції

Четвертим етапом є доповнення моделі декоративними деталями та елементами. При необхідності надання новому виробу виразних ознак ретро стилю ці елементи можуть бути аналогічними до декоративних деталей стилю модерн. При розробці перспективних моделей вони обираються відповідно до сучасних тенденцій моди (рис. 9). Контури цих деталей зарисовують безпосередньо на ескізі виробу, орієнтуючись на розміри, пропорції та пластику форми моделі. Для забезпечення реалістичності зображення промальовують найдрібніші деталі конструкції.

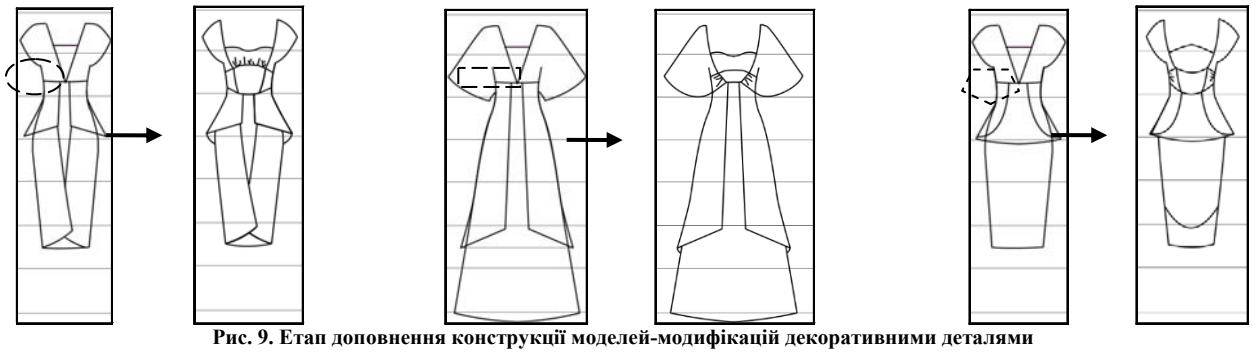


Рис. 9. Етап доповнення конструкції моделей-модифікацій декоративними деталями

П’ятим – заключним етапом ескізного проекту є вибір кольорової гами та фактури основних і декоративних матеріалів та нанесення їх на технічні ескізи моделей. Для цього використовують інструменти прикладних дизайнерських програм GIMP, Xara, Adobe Photoshop [12]. Зразки кольорів та фактури тканин, фурнітури та декоративних елементів обирають з урахуванням сучасних тенденцій моди із електронних каталогів тканин та фурнітури [13, 14]. Розміри обраних декоративних елементів масштабують у відповідності до розмірів ескізу та наносять їх на необхідні ділянки виробу. Насиченість кольору регулюють використовуючи функції кольорової палітри.

Розроблену в роботі базу даних комбінаторних груп типових моделей доцільно використовувати за основу при створенні сучасних моделей одягу, що значно спростить час пошуку та трансформації джерела творчості в сучасні моделі. Видозміна характерних конструктивно-декоративних ознак цих моделей дозволяє розроблювати різноманітні варіанти модифікацій моделей-ідей на одній типовій основі і серед них обирати найбільш перспективні.

В основі розробки колекцій одягу доцільно використовувати декілька базових моделей. В результаті видозміни їхніх елементів – отримувати ряди модифікацій моделей і з них формувати найбільш вдалі варіанти рішень в межах однієї колекції. Користуючись схемами маршрутів зміни конструктивних ознак суконь-аналогів можна здійснювати пошук нових моделей, відмінних від запропонованих.

Висновок

Розроблено структуру вихідних даних, необхідних для проектування одягу за аналогією з ретро стилем модерн, що скорочує час на формування основних його рис, як базових ознак джерела творчості. Розроблені типові моделі сучасних жіночих суконь, стилізованих у стилі модерн, рекомендовані для використання при розробці сучасних моделей одягу та формуванні їх гармонійного образу відповідно до сучасних тенденцій моди. Розроблено схеми маршруту зміни конструктивно-композиційних ознак жіночих

суконь при їх сучасній стилізації, що сприяє пошуку нових художньо-композиційних рішень моделей та їх грамотній адаптації до актуальних новинок моди.

Розроблено спосіб створення ескізного проекту сучасних моделей одягу за мотивами стилю модерн, який передбачає виконання 5 етапів. Перший та другий з них забезпечений технічною базою типових проектних модулів, що значно прискорює процес вибору та трансформації характерних ознак ретро стилю в сучасні стилізовані ознаки з урахуванням актуальних тенденцій моди.

Література

1. Зеллинг Ш. Мода. Век модельеров 1900–1999 / Шарлота Зеллинг ; пер. с немец. Ю. Бушуева, Г. Яшина. – Koln : Konemann, 2000. – 372 с. : ил.

2. Галаджева Г. Г. Эволюция кроя. В стиле модерн (прихотливые стилизации, мягкая пластичность линий и форм) / Галаджева Г. Г. // Ателье. – 2006. – № 8. – С. 40–43.

3. Вестникь моды. Журнал моды, хозяйства и литературы / Санкть-Петербургь: Изданиіе Н.П. Алловерт, 1914. – № 1. – С. 50–100.

4. Чупріна Н. В. Прогнозування формоутворення як етап художнього проектування костюма: серія «Теорія і практика наукових досліджень в дизайні» : [монографія] / Н. В. Чупріна. – К. : КНУТД, 2010. – 180 с.

5. Гусейнов Г.М. Композиция костюма : учеб. пособие для вузов / Гусейнов Г. М., Ермилова В. В., Ермилова Д. Ю. и др. – М. : Академия, 2003. – 432 с.

6. Fashiony. Коллекции одежды [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://fashiony.ru/index.php?id_r=2. – (Дата звернення: 20.10.16).

7. Модні сукні 2017 року з фото: новинки сезону осінь-зима [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://2017pik.pp.ua/moda-2017/191-modn-sukn-2017-roku-z-foto-novinki-sezonu-osn-zima.html#sel. – (Дата звернення: 7.09.17).

8. Славінська А. Л. Методи типового проектування одягу : навч. посібник / А. Л. Славінська. – Хмельницький : ХНУ, 2012. – 179 с.

9. Стиль и стилизация в дизайне [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://studopedia.su/18_143758_stil-i-stilizatsiya-v-dizayne.html. – (Дата звернення: 10.11.17). - Назва з екрану.

10. Горина Г. С. Моделирование формы одежды / Г. С. Горина. – М. : Легкая и пищевая пром-сть, 1981. – 184 с.

11. Козлова Т.В. Основы теории проектирования костюма : учеб. для вузов. – М. : Легкая промышленность и бытовое обслуживание, 1988. – 352 с.

12. Захаркевич О. В. Практикум з комп'ютерного проектування одягу : навч. посібник / О. В. Захаркевич, С. Г. Кулешова, О. М. Домбровська. – Хмельницький : ХНУ, 2016. – 311 с.

13. Виды узоров и принтов, расцветка ткани [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://fammeo.ru/articles.php?article_id=1124. – (Дата звернення: 21.05.17). - Назва з екрану.

14. Асортимент тканин та поштучних виробів [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://allrefrs.ru/3-28181.html. – (Дата звернення: 25.09.17).

References

1. Zelling Sh. Moda. Vek modelyerov 1900-1999 / Sharlota Zelling / Per. c nemets. Yu. Bushuyeva. G. Yashina. – Koln: Konemann. 2000. – 372 s.: il.

2. Galadzheva G. G. Evolyutsiya kroya. V stile modern (prikhotlivyye stilizatsii. myagkaya plastichnost liniy i form) / Galadzheva G. G. // Atelye. – 2006. - № 8. S. 40-43.

3. Vestnik mody. Zhurnal mody. khozyaystva i literatury / Sankt-Peterburg: Izdaniie N.P. Allovert. – 1914. - №1. – S.50-100.

4. Chuprina N. V. Prohnozuvannia formoutvorennia yak etap khudozhnoho proektuvannia kostiuma: seriia «Teoriia i praktyka naukovykh doslidzhen v dyzaini»: [monohrafiia] / N. V. Chuprina. – K. : KNUTD, 2010. – 180 s.

5. Huseinov H.M. Kompozytsyia kostiuma: ucheb. posobye dlia vuzov / Huseinov H. M., Ermylova V. V., Ermylova D. Yu. y dr. — M.: Akademyia, 2003. — 432 s.

6. Fashiony. Kollektsyy odezhdы [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: http://fashiony.ru/index.php?id_r=2. – (Data zvernennia: 20.10.16). - Nazva z ekranu.

7. Modni sukni 2017 roku z foto: novynky sezonu osin-zyma. / [Elektronnyi resurs]. - Rezhym dostupu: http://2017pik.pp.ua/moda-2017/191-modn-sukn-2017-roku-z-foto-novinki-sezonu-osn-zima.html#sel. – (Data zvernennia: 7.09.17). - Nazva z ekranu.

8. Slavinska A. L. Metody typovoho proektuvannia odiahu: navch. posibnyk / A. L. Slavinska. – Khmelnytskyi : KhNU, 2012. – 179 s.

9. Stil i stilizatsiya v dizayne. [Elektronniy resurs]. – Rezhim dostupu: https://studopedia.su/18_143758_stil-i-stilizatsiya-v-dizayne.html. – (Data zvernennya: 10.11.17). - Nazva z ekranu.

10. Gorina G. S. Modelirovaniye formy odezhdy / G. S. Gorina. — M.: Legkaya i pishchevaya prom-st. 1981. — 184 s.

11. Kozlova T.V. Osnovy teorii proyektirovaniya kostyuma: ucheb. dlya vuzov / M.: Legkaya promyshlennost i bytovoye obsluzhivaniye. 1988. – 352 s.

12. Zakharkevych O. V. Praktykum z kompiuternoho proektuvannia odiahu: navch. posibnyk / O. V. Zakharkevych, S. H. Kuleshova, O. M. Dombrovska. – Khmelnytskyi: KhNU, 2016. – 311 s.

13. Vydы uzorov y pryntov, rastsvetka tkany. [Elektronnyi resurs]. - Rezhym dostupu: http://fammeo.ru/articles.php?article_id=1124. – (Data zvernennia: 21.05.17). - Nazva z ekranu.

14. Asortyment tkanyn ta poshtuchnykh vyrobiv. [Elektronnyi resurs]. - Rezhym dostupu: http://allrefrs.ru/3-28181.html. – (Data zvernennia: 25.09.17). - Nazva z ekranu.

Рецензія/Peer review : 14.11.2017 р. Надрукована/Printed :06.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Славінська А.Л.

УДК 687.13.016

О.С. ВАСИЛЬЄВА, А.С. ДВОЙНИХ,
С.М. ЧЕРВОНЮК, І.В. ВАСИЛЬЄВА, М.В. КОЛОСНІЧЕНКО
Київський національний університет технологій та дизайну

СИСТЕМАТИЗАЦІЯ АСОРТИМЕНТУ ТА КОЛЬОРОВИХ РІШЕНЬ ФОРМЕНОГО ОДЯГУ ДЛЯ ДІТЕЙ МОЛОДШОЇ ШКІЛЬНОЇ ГРУПИ

В роботі представлено результати аналізу ринку шкільної форми України та вподобань споживачів стосовно її вибору. Запропоновано угрупування різновидів типових художньо-конструктивних рішень за асортиментом та статевою ознакою. На основі методу системного аналізу розроблено класифікацію типових конструктивних рішень форменого одягу для дівчаток та хлопчиків молодшої шкільної групи. У статті розглянуто особливості сприйняття дитиною різноманітних кольорів і їх психофізіологічний вплив на неї. Проаналізована кольорова гама існуючого шкільного форменого одягу для дітей молодшої шкільної групи та вподобання споживачів при її виборі. Розроблено рекомендацій щодо підбору гардеробу та кольорового рішення шкільного форменого одягу з метою поліпшення фізичного і психофізіологічного стану дитини.

Ключові слова: шкільна форма, асортимент, формений одяг, молодша шкільна група, колір, кольорова гамма.

O.S. VASILYEVA, A.S. DVOINYKH, S.M. CHERVONIUK, I.V. VASILYEVA, M.V. KOLOSNICHENKO
Kyiv National University of Technologies and Design

SYSTEMATIZATION OF ASSORTMENT AND COLOUR DECISIONS OF SCHOOL UNIFORM FOR CHILDREN OF JUNIOR AGE

The results of market of school form of Ukraine and tastes of consumers analysis are in-process presented in relation to her choice. The group of varieties of typical artistically-structural decisions is offered after an assortment and sexual character. On the basis of method of analysis of the systems classification of typical structural decisions of service dress is worked out for girls and boys of junior school group. In the article the features of perception of various colours a child are considered and them psychophysiological influence on her. The analysed coloured gamut of existent school service dress is for the children of junior school group and taste of consumers at her choice. The questionnaire questioning of children, parents and pedagogical workers of schools of Kyiv is conducted. An analysis undertaken a study showed that 75% respondent consider it necessary the use of school form for the children of junior school recommendations for the selection of wardrobe and colour decision of school uniforms have been developed in order to improve the physical and psychophysiological state of the child. At the reasonable choice of stylish decision of service dress of 60% respondents gave advantage to classic and business style, 30 %- to sporting, and 10% respondents was not able to answer a question. Preferences of consumers is certain in relation to basic descriptions of form of wares of service dress of children of midchildhood of different assortment groups. The more than 80% respondents give advantage to the clothing from natural raw material and clothing from textile materials in that the admixture of synthetic fibers does not exceed 30. It is conducted analysis, generalization and systematization of information about the service dress of schoolchildren, consumer advantages are set in relation to the rational structure of assortment of complete sets of school form, them the coloured decisions, composition-structural signs and finishing, types of textile materials are for making.

Key words: school uniform, assortment, younger school group, colour.

Вступ

В теперішній час актуальною є потреба забезпечення раціональних ергономічних проектних рішень, що відповідають умовам експлуатації споживчих товарів [1–3]. Вироби, що виготовляються на виробництві, часто не відповідають сучасним потребам. Основна проблема полягає в тому, що використовувана інформаційна база даних для проектування одягу найчастіше не враховує багатьох параметрів та відомості про сучасні вподобання та вимоги споживачів. Саме це у кінцевому результаті призводить до зниження показників якості продукту та рівня попиту на готовий виріб. Сучасний формений одяг для учнів молодшої шкільної групи, дітей віком від шести з половиною до одинадцяти з половиною років, – це складний об'єкт, дизайн-проектування якого пов’язано з проблемами фізичного розвитку, патріотичного, естетичного і етичного виховання, зі створенням умов для всебічного розвитку дитини. Науковці протягом багатьох років працюють над вдосконаленням дитячого одягу. Вагомий внесок у теорію і практику проектування дитячого одягу внесли такі вчені, як Є.Б. Коблякова, Л.П. Шершньова, Г.Л. Бескоровайная, Т.М. Баранова, К.Л. Пашкевич та інші [1–9].

Авторами в роботі [1] визначено принципи формування асортименту колекцій дитячого одягу на основі аналізу фешн-ринку дитячої моди, одягу відомих брендів, визначено тенденції дитячої моди та правила формування колекцій одягу у стилі «familylook».

В статті [2] авторами розглянуто процес асоціативної трансформації моделей дитячого одягу способом образно-асоціативного мислення. Ними застосовано принципи морфологічної трансформації для розробки колекцій моделей дитячого одягу з поліпшеними експлуатаційними та естетичними показниками якості та новими функціональними можливостями.

У статті [3] розглянуто шляхи удосконалення процесу проектування дитячого одягу на етапах визначення вихідних даних для побудови базової конструкції і розробки модельної конструкції. Авторами запропонований метод визначення місця розташування і розмірних характеристик захисних елементів багатофункціонального дитячого одягу для катання на роликах.

Авторами [4] відображено результати дослідження колірних переваг дітей в одязі, розглянуто

символіку кольору в одязі як фізіологічний фактор, який має вплив на психіку дитини з відхиленнями в роботі опорно–рухового апарату.

Авторами [5] на основі аналізу існуючих зразків шкільної форми та інших видів асортименту дитячого одягу для дітей молодшого шкільного віку визначено типові елементи трансформації та їх основні функції. На основі результатів аналізу встановлено відповідність між ними і базовими принципами трансформації, запропоновано класифікацію видів і принципів конструктивної реалізації функцій трансформації дитячого шкільного одягу і гардеробу, класифікацію елементів трансформації та схему типів та видів структурних зв'язків деталей і елементів шкільної форми, що підлягають трансформації.

Однак, існуючі на сьогодні результати досліджень потребують постійного оновлення у зв'язку зі зміною умов життя, вподобань та вимог споживачів. Саме тому розробка рекомендацій щодо раціонального переліку складових гардеробу, визначення оптимальних художньо-конструктивних рішень сучасного форменого одягу для дітей молодшої шкільної групи та їх систематизація є вкрай важливим.

У роботі використана загальна методологія системного підходу до проектування форменого одягу. Для обробки результатів досліджень застосовано системно-структурний аналіз та статистичні методи обробки результатів. Теоретичним підґрунтям дослідження стало анкетне опитування, аналіз, узагальнення і систематизація існуючих різновидів дитячого одягу. Під час досліджень проведено маркетинговий аналіз асортименту шкільного форменого одягу на території України, на основі результатів якого визначено основні вподобання споживачів при виборі та комплектності виробів.

Експериментальна частина

Метою даної роботи є аналіз, узагальнення і систематизація інформації про формений одяг дітей молодшої шкільної групи, розробка рекомендацій щодо конструктивно-технологічних рішень виробів при дизайн-проектуванні шкільної форми. Мета роботи полягає в удосконаленні дизайн-проектування форменого одягу для дітей молодшої шкільної групи на основі розробки структури асортименту комплектів шкільної форми, отримання додаткової інформації про споживчі вимоги до визначеного виду асортименту. Як відомо, вимоги – це своєрідна інформація про те, яким властивостям одягу та їх ознакам надається перевага у певний час та у певній ситуації використання виробу. Формування раціонального переліку споживчих вимог до форменого одягу для дітей молодшої шкільної групи, яким вироби мають відповідати в процесі проектування та виробництва, є вкрай важливими.

Сьогодні в Україні шкільна форма не є обов'язковою для використання в загальноосвітніх навчальних закладах, але завжди використовується в спеціалізованих школах, ліцеях, гімназіях тощо. Більшість же навчальних закладів рекомендує лише обов'язкову кольорову гаму одягу та перелік асортименту виробів, який при цьому можна використовувати [11, 12]. Саме тому на першому етапі досліджень для обґрунтування асортименту, комплектності та кольорової гами виробів форменого одягу форменого одягу було проведено анкетне опитування 150 школярів віком від шести з половиною до десяти років та їх батьків в загальноосвітніх школах міста Києва. Обробку результатів виконано методами математичної статистики. Аналіз результатів опитування показав, що більш ніж 75% батьків школярів молодших класів вважають необхідним використання шкільної форми. Щоправда, їх думки розійшлись стосовно її уніфікованого вигляду. Більшість виступають лише за спільний колір одягу. Тієї ж думки дотримуються самі школярі та навчально-педагогічні працівники шкіл.

На основі аналізу результатів анкетного опитування в школах встановлено, що більшість вважає необхідність враховувати сезонність при складанні комплектів та гардеробу шкільної форми. Комплект одягу школяра, на думку батьків, повинен містити раціональний перелік виробів, які забезпечать його зміну у відповідності до параметрів навколишнього середовища та умов використання під час всього навчального процесу протягом року. Він повинен складатися з різноманітних взаємозамінних різновидів одягу, що використовують в різні пори року, та забезпечувати швидку адаптацію до змін погодних умов.

В ході проведених досліджень встановлено, що більшість батьків (70%) купують шкільний одяг терміном носіння на два роки, і лише 14% – всього на рік. Значна частка батьків на сьогодні можуть дозволити собі витрати на покупку одягу для школи навіть більше ніж два роки (16%). Як відомо, для дітей молодшої шкільної групи віком від шести з половиною до одинадцяти з половиною років характерні швидкі зміни зросту, довжини кінцівок та інших частин і ділянок тіла. Тому більшість батьків зацікавлені в наявності елементів та деталей у виробах, що забезпечують завдяки трансформації одягу відповідність розмірам тіла дитини, її вподобання та умовам використання (основний час навчання, групи подовженого дня, вільний час тощо). Це стосується передусім елементів, які дозволяють змінювати довжину виробів (штанів та спідниць) та бретелей спідниць та сарафанів, ширину виробів по лінії талії тощо. Зацікавлені споживачі в зміні зовнішнього вигляду виробів відповідно до ситуації. Наприклад, використання різноманітних знімних деталей в сарафанах дозволяє використовувати його ще і як спідницю, а різноманітні знімні коміри, манжети, нижні спідниці тощо дозволяють змінювати зовнішній вигляд одягу, перетворюючи його з повсякденного на святковий. Застосування виробів з трикотажних полотен в гардеробі школярів дає змогу зробити одяг більш ергономічним і комфортним при повсякденному використанні завдяки його розтяжності.

При обґрунтованому виборі стильового рішення форменого одягу 60% респондентів віддавали перевагу класичному та діловому стилю, до 30% – спортивному, а 10% опитаних не змогли відповісти на питання. Однак досліджено, що комплекти повсякденного призначення хлопчиків найбільш часто

використовують вироби класичного та спортивного стилів.

У асортименті форменому одязі дівчат молодшої шкільної групи крім класичного (40%), спортивного (28%) та ділового (15%) стилів розповсюдженими є блузки, спідниці та сарафани з елементами романтичного и ентостилів.

Для удосконалення дизайн-проектування та підвищення якості шкільної форми для дітей молодшої шкільної групи досліджено споживчі вподобання стосовно асортименту форменого одягу. За результатами анкетування визначено асортимент комплектів та виробів, якому надають перевагу учні молодшої шкільної групи та їх батьки. Встановлено, що думки батьків та школярів мають несуттєві відмінності.

В ході роботи визначено, що теплі светр або джемпер в шкільному гардеробі бажають мати 95%, джемпер або фуфайку літні – 91%, блузку – 90%, штани – 85%, сарафан – 82%, жакет або куртку трикотажні – 80%; спідницю – 78%, жакет з тканини – 29%, сукню – 12% дівчаток молодшої шкільної групи та їх батьків.

За результатами опитування визначено асортимент комплектів форменого одягу для дівчат, який містить сарафан, спідницю, штани, джемпер або светр теплі та літні, блузку і жакет трикотажний. Було виокремлено типові конструктивні рішення визначених видів асортименту одягу для дівчаток молодшої шкільної групи. **Так споживачів надають перевагу б**лузкам з довгими широкими рукавами, різноманітними комірами, рюшами і шлярками з основної тканини або гіпюру. Спідниці найчастіше вибирають трапецієподібної форми з поясом та накладними кишенями або складками. Стосовно джемперів та светрів трикотажних, то переваги надаються класичним моделям з вшивними рукавами, що кроєні з полотна або зв'язані на пласкофангових машин 8 та 10 класів. На рис. 1–4 представлено типові конструктивні рішення існуючі різновидів сучасних виробів, що входять комплектів шкільної форми, яким надають перевагу дівчата молодшої шкільної групи та їх батьки.

Рис. 1. Різновиди типових конструктивних рішень сучасних спідниць комплектів форменого одягу для дівчата молодшої шкільної групи

Рис. 2. Різновиди типових конструктивних рішень сучасних трикотажних виробів комплектів форменого одягу для дівчата молодшої шкільної групи

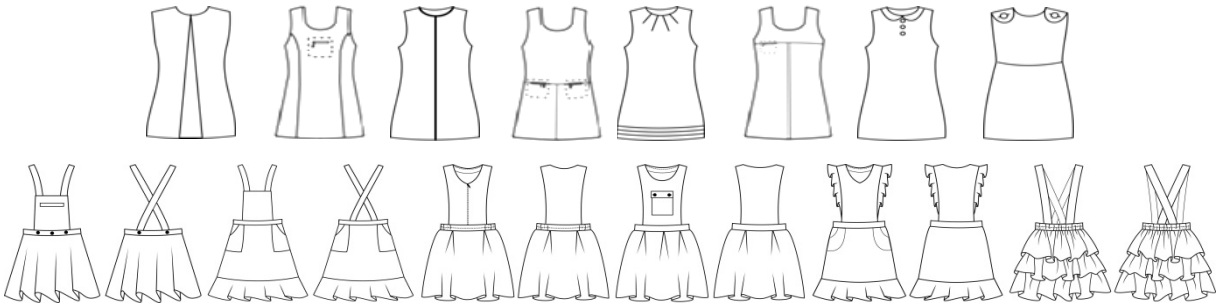


Рис. 3. Різновиди типових конструктивних рішень сучасних сарафанів комплектів форменого одягу для дівчата молодшої шкільної групи

Рис. 4. Різновиди типових конструктивних рішень жакетів комплектів форменого одягу для дівчата молодшої шкільної групи

В ході роботи визначено, що асортименту виробів комплектів форменого одягу хлопчиків молодшої шкільної групи більш сталий. 100% хлопчиків використовують штани і більша половина з них (до 58%) віддають перевагу джинсам. Визначено, що джемпер, светр або фуфайку в шкільному комплекті бажають мати 92%, сорочку – 85%, жилет – 55% хлопчиків. При цьому значно зменшилася частка респондентів, які надають перевагу у повсякденному носінні піджакам з тканини (лише 15%). При цьому на сьогодні саме цей вид асортименту є складовою до 90% усіх комплектів шкільного одягу для хлопчиків молодшої шкільної групи, що випускає вітчизняна промисловість. За результатами опитування визначено, що асортимент комплектів форменого одягу для хлопчиків повинен включати жакети і куртки з трикотажних полотен (до 45% опитаних), які забезпечують більшу комфортність та споживчу технологічність. На основі аналізу зразків сучасних комплектів шкільної форми для хлопчиків молодшої шкільної групи визначено типові конструктивні рішення в кожній асортиментній групі одягу (рис. 5).

За результатами досліджень було визначено вподобання споживачів стосовно основних характеристик форми виробів форменого одягу дітей молодшого шкільного віку різних асортиментних груп. Встановлено, що біля 85% респондентів надають перевагу середньому ступеню об'ємності виробів. В ході роботи визначено, що дівчаткам та їх батькам подобаються жакети напівприлеглого (51%) та прямого (35%) силуетів, сарафани напівприлеглого (43%), прямого (34%) силуетів та силуету «трапеція» (20%), спідниці силуету «трапеція» (83%), блузки прямого силуету (85%). Прилеглий силует до 75% респондентів обирали для джемперів та фуфайок. Хлопчики та їх батьки обирали прямий силует для жилетів (47%), піджаків (59%), жакетів та курток трикотажних (95%), джемперів (65%), светрів (75%), сорочок (88%), а напівприлеглий – для піджаків (41%) і жилетів (53%).

Рис. 5. Різновиди типових конструктивних рішень складових сучасних комплектів шкільної форми для хлопчиків молодшої шкільної групи

За результатами досліджень визначено вимоги споживачів стосовно вибору основного кольору і кольорових поєднань в комплектах шкільної форми. Як відомо, на психологічний і навіть фізіологічний стан дітей великий вплив має колір оточуючого середовища та одягу. Колір впливає на емоційний стан дитини та на її працездатність. Сьогодні здебільшого в школах України застосовується регламентована для певної школи кольорова гама. Психологи впевнені – колір дитячого одягу впливає на самооцінку, здоров'я і самопочуття дитини, сприйняття оточуючих, настрій та навіть поведінку [4, 9]. Кожний колір або сполучення кольорів чинять визначений психологічний вплив, який необхідно враховувати при проектуванні форменого одягу. Саме тому правильний підбір кольорової гами є надзвичайно важливим при проектуванні форменого одягу для дітей молодшого шкільного віку. За результатами досліджень було визначено психологічний і емоційний вплив кольорів, які запропоновано для шкільної форми, на дитину (табл. 1).

За результатами досліджень визначено, що на сьогодні більшість дітей та їх батьків надають перевагу форменому одягу темно синього, чорного та сірого кольорів, а також з задоволенням їх поєднують. Одяг бордового та зеленого кольору сьогодні вибирають лише у випадках, коли ці кольори є обов'язковими для певного навчального закладу (рис. 5).

За результатами досліджень визначено, що на сьогодні більшість дітей та їх батьків надають перевагу форменому одягу темно синього, чорного та сірого кольорів, а також з задоволенням їх поєднують. Одяг бордового та зеленого кольору сьогодні вибирають лише у випадках, коли ці кольори є обов'язковими для певного навчального закладу (рис. 5).

Аналіз результатів досліджень показав, що 35% респондентів надають перевагу двоколірним комплектам, в яких жакет, піджак, спідниця, штани або сарафан – одного кольору, светр, джемпер, сорочка, блузка або фуфайка – іншого кольору, 65% – трьохколірному комплекту, в яких штани, спідниця або сарафан одного кольору, верхній плечовий виріб (жакет, куртка, джемпер, піджак) – другого, сорочка, блузка або легкий джемпер – третього. У комплектах часто використовують штани та спідниці чорного кольору (рис. 6).

Визначено, що при виборі блузок, сорочок, джемперів, светрів і фуфайок при складанні комплектів споживачі надають перевагу однотонній тканині або трикотажному полотну, які за кольором гармонують з основним кольором шкільної форми. Основними кольорами для цих видів одягу є білий для повсякденного носіння та урочистих подій, блакитний, світло жовтий, світло сірий, світло рожевий і молочний – для повсякденного носіння. В ході досліджень визначено переваги школярів та їх батьків стосовно видів оздоблення форменого одягу (рис. 7).

Таблиця 1

Характеристика психологічного і емоційного впливу кольорів шкільної форми на дітей молодшого шкільного віку

Назва кольору	Загальні відомості	Вплив кольору на психіку та емоції дитини	
		Позитивний	Негативний
1	2	3	4
Зелений	Колір рослинного світу, що пов'язує нас з природою, асоціюється з ростом та розвитком. Зелений – один з основних кольорів в гардеробі як хлопчика, так і дівчинки	Активності, бадьорості, працьовитість, врівноваженість, розвиток, спокій, впевненість, зацікавленість, витривалість, життєлюбність, раціональний підхід до вирішення проблеми. Сприяє розумовій праці	Послаблює інтуїцію, посилює практицизм, заважає розвитку творчості
Синій	Надзвичайно м'який і охолоджений контраст до всього неспокійного та яскравого. Традиційно вважається чоловічим, Емоційним та знервованим допомагає тримати себе в руках, відокремлюючи важливе від другорядного	Розвиток уяви, зосередження уваги, заспокоєння, зібраність, відповідальність, колективізм. Сприяє розумовій праці та рівновазі	Зниження активності, емоційна холодність, консерватизм, посилення нетовариськості дітей
Фіолетовий (бордовий)	Колір несвідомого і таємничого, то загрозливого, то підбадьорливого	Просвітлення, спокій, внутрішня гармонія	Пригнічення, траур, смуток, депресія
Чорний	Має дуже істотний вплив. Викликає песимістичний настрій, почуття пригніченості	Зосередженість, таємничість, сила, елегантність, розкіш	Замкнутість, пригніченість, страх, песимізм
Сірий	**Сірий** – фоновий колір. Колір твердої стабільності	Охайність, реалізм та респектабельність, контроль емоцій	Нудьга, пригніченість, апатія, туга та меланхолія
Білий	Білий колір підходить майже до всього. Надає одягу охайність і свіжість. Звичайно, незамінний у гардеробі дітей в свята. Доречним є поєднання білого з іншими основними кольорами	Асоціюється з чистотою, стимулює підтримку порядку. Символізує світло, легкість, відвертість	Вразливість, беззахисність, байдужість

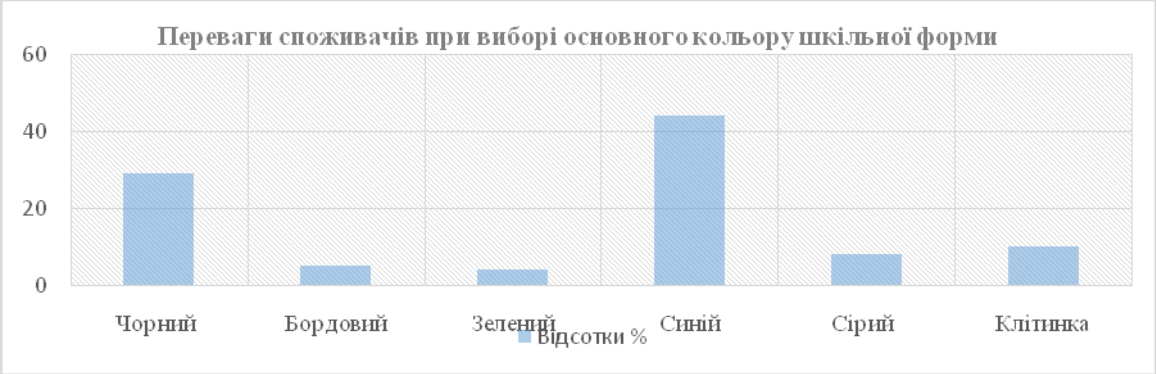


Рис. 5. Переваги споживачів при виборі основного кольору шкільної форми

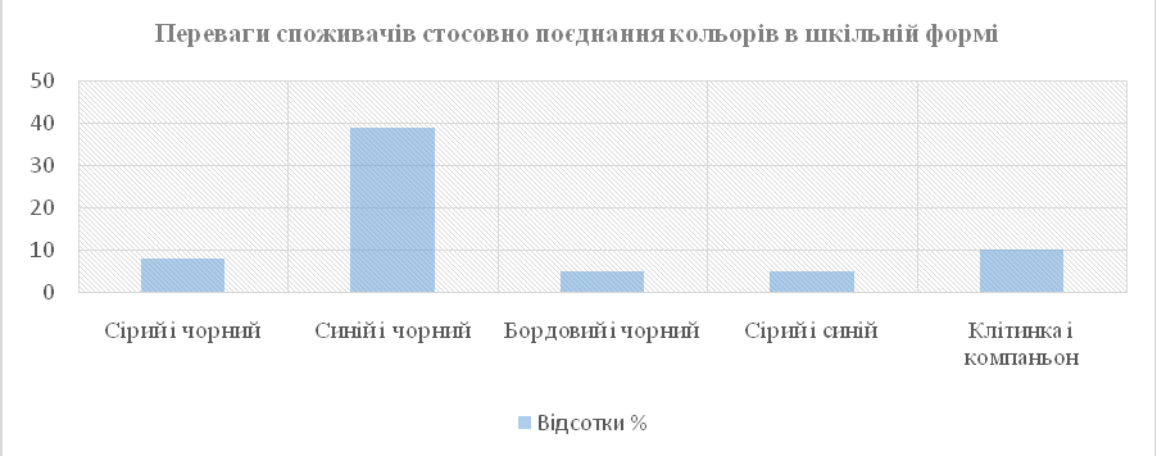


Рис. 6. Переваги споживачів стосовно поєднання кольорів в шкільній формі

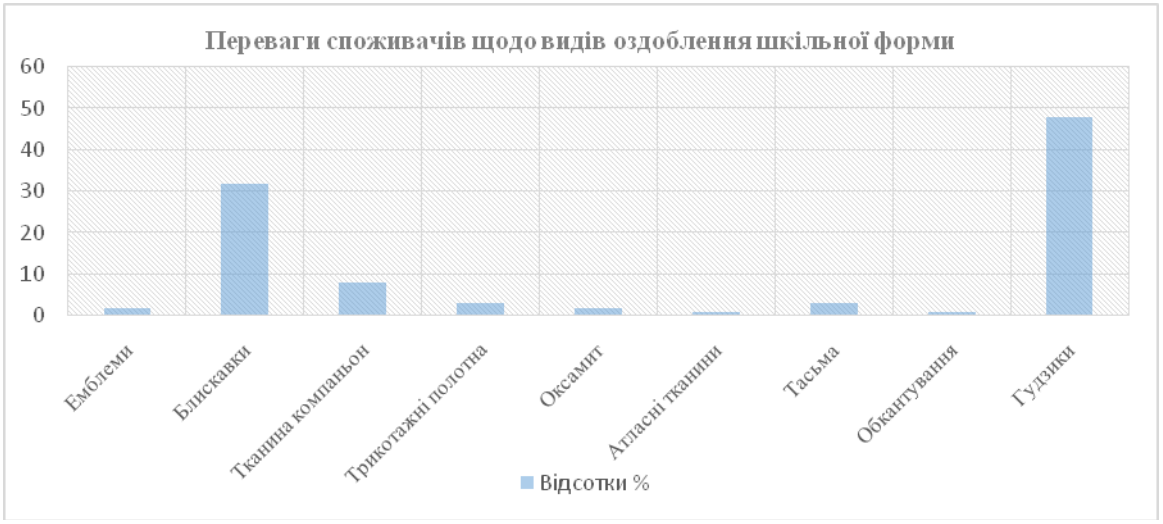


Рис. 7. Переваги споживачів щодо видів оздоблення шкільної форми

За результатами досліджень визначено, що на сьогодні споживачі надають перевагу виробам виготовленим з трикотажних полотен при виборі сарафанів (35%), спідниць (20%), жилетів (42%), жакетів та курток (28%), джемперів, светрів та фуфайок (100%). Підвищення попиту на одяг з трикотажних полотен пояснюється його надійністю, зручністю у користування та високими споживчими властивостями, такими як: гігієнічність, здатність тривалий час зберігати задану форму при достатній еластичності, м'якість, стійкість до стирання. Тканинам з домішками еластину надають перевагу при виборі жакетів (27%), сорочок – (22%) і блузок – (20%). Класичні тканини для шкільної форми вибирають в основному для поясних виробів (спідниці – 70% та штани – 65%), а також піджаків (понад 70%), жакетів (34%), жилетів (40%) і сарафанів (45%).

В ході роботи визначено, що більш ніж 80% респондентів надають перевагу одягу з натуральної сировини та одягу з текстильних матеріалів, в яких домішки синтетичних волокон не перевищує 30%. На думку батьків дітей молодшого шкільного віку, наявність певної частки синтетичних волокон в матеріалах для виготовлення шкільної форми забезпечує збереження зовнішнього виду виробу та його форми, зручність у користуванні та догляді під час експлуатації.

За результатами досліджень систематизовано інформацію про сучасний формений одяг для дітей молодшої шкільної групи, визначено споживачі переваги стосовна комплектності, кольорових рішень та композиційно-конструктивних ознак шкільної форми.

Висновки

В ході роботи визначено обов'язковість шкільної форми для дітей молодшої шкільної групи, проведено аналіз, узагальнення і систематизацію інформації про формений одяг школярів, розроблено класифікації різновидів типових конструктивних рішень складових сучасних комплектів шкільної форми, встановлено споживчі переваги стосовно раціональної структури асортименту комплектів шкільної форми, їх кольорових рішень, композиційно-конструктивних ознак та оздоблення, видів текстильних матеріалів для виготовлення.

Література

1. Ісаєв О.А. Прогнозування асортименту сучасних колекцій дитячого одягу / О.А. Ісаєв, Т.М. Богомазюк, К.Л. Пашкевич, О.Д. Герасименко, О.Д. Ткачук // Вісник КНУТД – 2017. – № 4(112). – С. 182–192.

2. Ніколаєва Т.І. Розробка моделей дитячого одягу на основі принципів біоніки і трансформації / Т.І. Ніколаєва, К.Л. Процик, Л.В. Назарчук // Вісник КНУТД. – 2011. – №2. – С. 178 – 184.

3. Omelchenko G.V. Theprocessofdesigningthechildren`sclothesfortrainingsonroller-skates / G.V. Omelchenko, M.V. Kolosnichenko, S.V. Donchenko, K.L. Pashkevich // Vlakna a Textil. – 2016. – № 4. – Vol. 23. – С. 21–26.

4. Гайдашевська О.Б. Сприйняття психологічного аспекту кольору в проектуванні дитячого одягу / О.Б. Гайдашевська, А.Л. Славінська // Вісник Хмельницького національного університету. – 2011. – № 3 – С. 69–72.

5. Васильєва О.С. Розробка класифікації видів і принципів конструктивної реалізації функції трансформації дитячого шкільного одягу і гардеробу / О.С. Васильєва, О.В. Колосніченко, І.В. Васильєва, Н.В. Остапенко // Теорія і практика дизайну : збірник наукових праць. Технічна естетика – К. : "Дія", 2017. – Вип. 12. С. 3–14.

6. Бескоровайная Г.П. Проектирование детской одежды : учеб. пособ. / Г.П. Бескоровайная, С.В. Куренова. – М. : Мастерство, 2000. – 96 с.

7. Пашкевич К.Л. Конструювання дитячого одягу : навчальний посібник / К.Л. Пашкевич,

Т.М. Баранова. − К. : ПП НВЦ Профі, 2012. – 320 с.

8. Ергономіка і дизайн. Проектування сучасних видів одягу / М.В. Колосніченко, Л.І. Зубкова, К.Л. Пашкевич та інші. – К. : ПП«НВЦ «Профі», 2014. – 386 с.

9. Дизайн-проектування виробів спеціального призначення : навчальний посібник / Н.В. Остапенко, М.В. Колосніченко, Т.В. Луцкер та ін. – К. : КНУТД, 2016. – 320 с.

10. Драгунский В.В. Цветовой личностный тест / В.В. Драгунский. – М. : Книга, 2007. – 444 с.

11. Шкільна форма для дівчат [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.milana.ua/shkolnaja-phorma-internet-magazin-shkolnaja-phorma-dlja-devochek/c-382_378.html

12. Шкільна форма для хлопчиків [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://m-moda.com.ua/ua/catalogue/index/4/1

References

1. Isaiev O.A. Prohnozuvannia asortymentu suchasnykh kolektsii dytiachoho odiahu / O.A. Isaiev, T.M. Bohomaziuk, K.L. Pashkevych, O.D. Herasymenko, O.D. Tkachuk // Visnyk KNUTD – 2017. – № 4(112). – S. 182–192.

2. Nikolaieva T.I. Rozrobka modelei dytiachoho odiahu na osnovi pryntsypiv bioniky i transformatsii / T.I. Nikolaieva, K.L. Protsyk, L.V. Nazarchuk // Visnyk KNUTD. – 2011. – № 2. – S. 178–184.

3. Omelchenko G.V. Theprocessofdesigningthechildren`sclothesfortrainingsonroller-skates / G.V. Omelchenko, M.V. Kolosnichenko, S.V. Donchenko, K.L. Pashkevich // Vlakna a Textil. – 2016. – № 4. – Vol. 23. – S. 21–26.

4. Haidashevska O.B. Spryiniattia psykholohichnoho aspektu koloru v proektuvanni dytiachoho odiahu / O.B. Haidashevska, A.L. Slavinska // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2011. – №3 – S. 69-72.

5. Vasylieva O.S. Rozrobka klasyfikatsii vydiv i pryntsypiv konstruktyvnoi realizatsii funktsii transformatsii dytiachoho shkilnoho odiahu i harderobu / O.S. Vasylieva, O.V. Kolosnichenko, I.V. Vasylieva, N.V. Ostapenko // Teoriia i praktyka dyzainu: Zbirnyk naukovykh prats / Tekhnichna estetyka. K.: "Diia", 2017. – Vyp. 12. – S. 3–14.

6. Beskorovainaia H.P. Proektyrovanye detskoi odezhdy: Ucheb. posob. / H.P. Beskorovainaia, S.V. Kurenova – M.: Masterstvo, 2000. – 96 s.

7. Pashkevych K.L. Konstruiuvannia dytiachoho odiahu: Navchalnyi posibnyk. / K.L. Pashkevych, T.M. Baranova. − K.: PP NVTs Profi, 2012. – 320 s.

8. Erhonomika i dyzain. Proektuvannia suchasnykh vydiv odiahu / M.V. Kolosnichenko, L.I. Zubkova, K.L. Pashkevych ta inshi. – K.: PP«NVTs «Profi», 2014. – 386 s.

9. Dyzain-proektuvannia vyrobiv spetsialnoho pryznachennia: Navchalnyi posibnyk / N.V. Ostapenko, M.V. Kolosnichenko, T.V. Lutsker ta in. – K.: KNUTD, 2016. – 320 s.

10. Drahunskyi V.V. Tsvetovoi lychnostnyi test / V.V. Drahunskyi. – M.: Knyha, 2007. – 444 s.

11. Shkilna forma dlia divchat. URL: http://www.milana.ua/shkolnaja-phorma-internet-magazin-shkolnaja-phorma-dlja-devochek/c-382_378.html

12. Shkilna forma dlia khlopchykiv. URL: http://m-moda.com.ua/ua/catalogue/index/4/1

Рецензія/Peer review : 25.11.2017 р. Надрукована/Printed :05.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Остапенко П.В.

УДК 675.024

М.О. МАРУХЛЕНКО
Київський національний університет технологій та дизайну
О.Р. МОКРОУСОВА
Київський національний торговельно-економічний університет

ОПТИМАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ ДУБЛЕННЯ ШКІРИ З ВИКОРИСТАННЯМ МОНТМОРИЛОНІТУ

Стаття присвячена визначенню оптимальних параметрів процесу дублення з використанням модифікованих дисперсій монтморилоніту. Одержано адекватну математичну модель, що описує вплив модифікованої дисперсії монтморилоніту під час дублення на показники готових шкір. За допомогою комп'ютерного моделювання встановлено оптимальні параметри дублення, які зменшенням витрат сполук хрому при дубленні, сприяють кращому відпрацюванню робочих рідин та покращенню експлуатаційних властивостей шкір.

Ключові слова: дисперсія, модифікація, монтморилоніт, хромовий дубитель, виробництво шкір.

M.O. MARUKHLENKO
Kiev National University of Technologies and Design
O.R. MOKROUSOVA
Kiev National University of Trade and Economics

OPTIMAL PARAMETERS OF TANNING WITH MONTMORILLONIT

At present, increasingly important is the study of partial replacement of compounds of chromium tanning compounds of other nature for the production of skins. This replacement can be carried out by combining chromium compounds with other inorganic tannins or combined tanning with organic tanners. The article is devoted to the determination of optimal parameters of the tanning process using modified dispersions of montmorillonite with collagen dermis. In connection with the creation of a chromosome technology of production of leather from raw material of cattle by applying a modified dispersion of montmorillonite during tanning of the head, a mathematical model of the tanning process is developed that adequately describes the dependence of the parameters of the leather semifinished product on the following factors: the expenditure of chromium tuning and the modified dispersion of montmorillonite, processing duration. Is was obtained adequate mathematical model that describes the effect of the modified dispersion of montmorillonite in tanning on the indices of finished skin was obtained on indicators of finished leather. The rational conditions of tanning using computer modelling were determined. It is that provides improve the exhaustion of tanning agent and performance properties of finished leather. It has been experimentally proved that as a result of the chromosomes method of tanning due to the use of modified dispersion of montmorillonite there is an increase in output parameters in the area of finished leather, mineral substances and the content of chromium oxide, which confirms the more effective working out of working fluids, better formation of the structure of the dermis.

Keywords: dispersion, modification, montmorillonite, chrome tanning agents, production of leather.

Вступ

Шкіра є одним із найбільш функціональних матеріалів для виготовлення найрізноманітніших виробів.

На сьогодні шкіряна промисловість приділяє достатньо уваги виробництву шкір для верху взуття. Для даного виробництва використовують широкий асортимент шкір із різної сировини, різних методів дублення та способів обробки лицьової поверхні.

Традиційно, під час основного процесу виробництва – дублення, який виконують для формування структури дерми використовують мінеральні та органічні дубителі [1].

В Україні найбільшу частку становлять шкіри виготовлені із шкур великої рогатої худоби (ВРХ), а у виробництві найчастіше застосовують хромовий метод дублення (частка становить 80-90 % від загального обсягу виробництва) [1, 2]. Це пов'язано з можливістю досягнення необхідних хімічних та фізико-механічних показників якості готових шкір, однак застосування хромових сполук в технологіях виробництва шкір має негативний вплив на навколишнє середовище. В зв'язку з цим шкіряна промисловість останніми роками приділяє багато уваги удосконаленню хромового методу дублення та вирішенню проблем очищення стічних вод, утилізації та повторного використання твердих хромвмістних відходів.

Тому в даний час все більшої актуальності набувають дослідження з частковою заміною сполук хрому дубильними сполуками іншої природи для виробництва шкір [3]. Така заміна може бути здійснена поєднанням сполук хрому з іншими неорганічними дубильними речовинами або комбіноване дублення з органічними дубителями [4].

За останні роки перспективним напрямком є виробництво шкіри з використання для дублення високодисперсних мінералів природного походження, в тому числі, монтморилоніту [2, 5], що сприяє скороченню витрат сполук хрому, під час дублення з подальшим зменшенням їх кількості в стічних водах, оскільки за традиційною технологією дублення близько 40 % хромових сполук залишаються у відпрацьованих робочих рідинах. Тому дуже актуальним також є напрям розробки та застосування модифікованих дисперсій монтморилоніту (МДМ) в технологічних процесах виготовлення шкір з метою зменшення витрат хромового дубителя, вирішення екологічних проблем та питань ресурсозбереження.

У попередніх роботах досліджено ефективність застосування дисперсії монтморилоніту під час процесу дублення з застосуванням модифікованих дисперсій монтморилоніту [6]. Авторами встановлено, доцільність застосування ММТ, за рахунок чого отримуються шкіри з підвищеним виходом за площею та

покращеними фізико-механічними властивостями.

Об`єкти та методи дослідження

Мета даної роботи – встановлення оптимальних параметрів дублення шкір з використанням монтморилоніту.

Об'єктом дослідження роботи є витрати матеріалів для дублення та показники якості готових шкір.

Для встановлення оптимальних параметрів процесу дублення голини з використанням МДМ було сформовано з пікельованої голини ВРХ методом асиметричної бахтарми 9 груп по 8 зразків в кожній розміром 5×15 см. Групи зразків 1 – 8 вважали дослідними, 9 група була контрольна. Обробку зразків всіх груп здійснювали за традиційною технологією дублення, що є діючою на ПАТ «Чинбар» (м. Київ) [7]. Для цього у відпрацьований пікельний розчин для обробки голини додавали хромовий дубитель (основність 38–40 %) в перерахунку на Cr_2O_3 від маси голини з витратами в межах 1,75-0,5 % відповідно до обробки дослідних груп, та 1,9 % для контрольної. Для дослідних груп через 1 год обробки та після досягнення повного пофарбування голини дубителем (наскрізний зелений колір в найтовщій ділянці дерми) в робочу рідину вводили МДМ при витраті 1-4 % (в перерахунку на абсолютно суху речовину) згідно розроблених витрат (табл. 1). Через 2 години обертання (3 год для обробки недвоєної голини) для всіх груп здійснювали підвищення основності сполук хрому додаванням карбонату натрію, витрата якого складала в межах 1,0-0,2 % для дослідних (1-8 група) та 1,35 % для контрольної групи зразків, у вигляді 10 % розчину у 3 прийоми з інтервалом 30 хв при безперервному обертанні барабану. Дублення завершували при досягненні значення pH робочої рідини на рівні 4,0–4,5 та отримання напівфабрикату стійкого до проби на «КІП».

Для дублення голини дослідних груп використовували МДМ, яку отримували наступним шляхом: до реактору, що оснащений механічною мішалкою, вводили розрахункову кількість бентонітової глини з вмістом основного мінералу монтморилоніту 85 %, 3-кратну кількість води температурою 50–65 ºС та карбонат натрію з витратою 6,0 % від маси сухого монтморилоніту у вигляді 10-відсоткового розчину, далі при перемішуванні протягом 2 год підтримували температуру на рівні 50–60 ºС (pH дисперсії складала 7,0–7,5). Після отримання стійкої та рівномірної дисперсії монтморилоніту виконували катіонування поверхні частинок мінералу, для чого в дисперсію монтморилоніту вводили розчин основного сульфату хрому в кількості 10,0 % від маси мінералу в перерахунку на Cr_2O_3. Перемішування продовжували ще 2 години до отримання однорідної маси сіро-голубого кольору. pH дисперсії складала 3,5–4,0. Крім того, загальні витрати хромового дубителя для дублення голини становили 1,2–1,5 % Cr_2O_3 від маси голини.

Після процесу дублення, всі зразки були прожировані, висушені у вільному стані, а після зволоження до вологості 26 % та обробки на тянульно-м'якшильній машині, досушені у вільному стані. Далі після кондиціонування та потрібних вимірювань виконували дослідження показників фізико-механічних та хімічних властивостей готових шкір за відповідними методиками [8].

Таблиця 1

Параметри процесу дублення

Витрата матеріалів від маси голини	Варіанти обробки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	Контрольна група
Хромовий дубитель, % Cr_2O_3	2	1,75	1,5	1,25	1,0	0,75	0,5	0,5	1,9
Модифікована дисперсія, % *	0,5	1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	–
Алюмосилікат натрію, %	–			–	–	–	–	–	1,6
Карбонат натрію, %	1,0	1,0	0,75	0,5	0,25	0,2	0,15	0,15	1,35

**в перерахунку на абсолютно суху речовину*

Для отримання об'єктивних результатів дослідження використано традиційні методи фізико-хімічних досліджень, а також статистичне та математичне моделювання [9–12].

Після проведення ряду попередніх досліджень визначили найбільш важливі фактори: X_1 – витрата хромового дубителя (ХД), %; X_2 – витрата модифікованої дисперсії монтморилоніту (МДМ), %; X_3 – тривалість обробки (Т), год., а також їх рівні та інтервал вимірювання (табл. 2).

Таблиця 2

Рівні та інтервали вимірювання факторів

Найменування фактору	Витрата, %		Тривалість, год.
	ХД	МДМ	
Кодове позначення	X_1	X_2	X_3
Нульовий рівень x_{i0}	1,25	2,0	2,25
Інтервал вимірювань Δx_i	0,5	0,5	0,5
Нижній рівень $x_{i\,min}$	0,5	0,5	1,5
Верхній рівень $x_{i\,max}$	2	3,5	3

За вихідні змінні (функції відгуку) обрали показники шкірного напівфабрикату, які дають більш повне уявлення про ефективність формування структури дерми на процесі дублення: масова частка оксиду хрому в шкірі (ОХ), температура зварювання ($Т_{зв}$). Матриця планування та параметри оптимізації наведені в табл. 3.

Для розрахунку та побудови компромісної оптимальної області процесу хромового дублення з використанням МДМ використали комп'ютерне моделювання за допомогою програми Statistica 6.0 (рис. 1).

Таблиця 3

Значення факторів і параметри оптимізації

№ досліду	Значення факторів			Значення вихідної змінної (функції відгуку)					
				ОХ,%			Тзв, °С		
	X_1	X_2	X_3	Y^1_{1u}	Y^1_{1u}	Y^1_{1u}	Y^2_{1u}	Y^2_{1u}	Y^2_u
1	+1	+1	+1	4,1	4,3	4,2	109	109	109
2	-1	+1	+1	4,2	4,2	4,2	105	105	105
3	+1	-1	+1	4,3	4,3	4,3	108	108	108
4	-1	-1	+1	4,8	4,6	4,7	106	106	106
5	+1	+1	-1	4,7	4,9	4,8	107	107	107
6	-1	+1	-1	4,5	4,3	4,4	107	107	107
7	+1	-1	-1	4,3	4,3	4,3	107	107	107
8	-1	-1	-1	4,2	4,4	4,3	104	104	104

Результати та їх обговорення

Після обробки результатів експерименту отримали адекватні математичні моделі рівнянь регресії (1–3) в кодованих одиницях, які описують залежності найбільш вагомих показників напівфабрикату від витрати основних матеріалів і тривалості процесу дублення:

а) вміст оксиду хрому:

$$Y = 4{,}40 - 0{,}05X_3 + 0{,}10X_1X_2 - 0{,}1X_1X_3 - 0{,}15X_2X_3 \quad (1)$$

Критерій Фішера F = 0,80 < $F_{табл}$ = 3,84 (рівень значущості а = 0,05; число ступенів свободи у знаменнику $f_1 = 8$; число ступенів свободи у чисельнику $f_2 = 4$), рівняння адекватне. Дисперсія відтворювана, похибка досліду $S^2_0 = S^2_y = 0{,}013$.

Критерій Кохрена G = 0,20 < $G_{табл}$ = 0,68 (рівень значущості а = 0,05; число ступенів свободи $f_1 = m - 1 = 1$ число ступенів свободи $f_2 = N = 8$), дисперсія відтворювана, похибка досліду $S_{20} = S_{1u} = 0{,}688$; значущість коефіцієнтів регресії (критерій Стьюдента): $t_{таб} = 2{,}31$, тоді $t_{b0} = 157{,}0 > t_{таб}$, значущий; $t_{b1} = 0 < t_{таб}$, незначущий; $t_{b2} = 0 < t_{таб}$, незначущий; $t_{b3} = 1{,}17 < t_{таб}$, незначущий; $t_{b12} = 5{,}06 > t_{таб}$, значущий; $t_{b13} = -> t_{таб}$, незначущий; $t_{b12} = 5{,}06 > t_{таб}$, значущий; $t_{b23} = 7{,}59 > t_{таб}$ значущий; $t_{b123} = 0 > t_{таб}$, незначущий.

Остаточне рівняння регресії:

$$\hat{Y}^1_u = 4{,}40 + 0{,}10X_1X_2 - 0{,}1X_1X_3 - 0{,}15X_2X_3 \quad (2)$$

б) температура зварювання:

$$Y = 106{,}66 + 0{,}50X_1 + 0{,}25X_2 - 0{,}13X_3 - 0{,}38X_1X_2 + 0{,}25X_2X_3 + 1{,}81X_1X_2X_3 \quad (3)$$

Критерій Фішера F = 0,43 < $F_{табл}$ =5,32 (рівень значущості а = 0,05; число ступенів свободи у знаменнику $f_1 = 8$; число ступенів свободи у чисельнику $f_2 = 1$), рівняння адекватне; критерій Кохрена G = 0,41< Gтабл = 0,68 (рівень значущості а = 0,05; число ступенів свободи $f_1 = m - 1 = 1$; число ступенів свободи $f_2 = N = 8$), дисперсія відтворювана, похибка досліду S20 = S2y = 1,40 s=0,83.

Значущість коефіцієнтів регресії (критерій Стьюдента): $t_{таб} = 2{,}31$, тоді $t_{b0} = 514{,}38 > t_{таб}$, значущий; $t_{b1} = 2{,}41 > t_{таб}$, значущий; $t_{b2} = 1{,}24 < t_{таб}$, значущий; $t_{b3} = 0{,}60 < t_{таб}$, значущий; $t_{b12} = 1{,}84 < t_{таб}$, значущий; $t_{b13} = 1{,}21 < t_{таб}$, незначущий; $t_{b23} = 0 < t_{таб}$, незначущий; $t_{b123} = 1{,}84 > t_{таб}$, незначущий.

Остаточне рівняння регресії:

$$\hat{Y}^2_u = 106{,}66 + 0{,}50X_1 + 0{,}25X_2 - 0{,}38X_1X_2 \quad (4)$$

Аналізуючи отримані рівняння регресії видно, що для вмісту оксиду хрому і температури зварювання найбільш вагомими факторами є витрата модифікованої дисперсії монтморилоніту та хромового дубителя, з підвищенням яких дані показники зростають. Позитивно впливає на ці показники зменшення тривалості процесу.

Для більш детального визначення оптимальних умов дублення з використанням модифікованих дисперсій монтморилоніту додатково було проаналізовано показники, такі як: вихід шкіри по площі, уявна питома вага, вміст оксиду хрому та мінеральних речовин у шкірі (табл. 4). Для порівняння були враховані

показники контрольної групи, а саме, зразки які оброблялися за стандартною методикою хромового дублення.

Аналізуючи отриманні рівняння регресі виявлено, що на оптимальні параметри дублення шкір впливають декілька вихідних змінних, тому необхідно було вирішити комплексне завдання, а саме: визначити експериментальне значення функції відгуку, що накладається на інші функції відгуку в межах досліджуваних областей, при яких параметри будуть відносно оптимальними. Результати побудови компромісної оптимальної області дублення з використанням МДМ наведенні на рис. 1.

Таблиця 4

Фізичні та фізико-механічні показники якості готових шкір

№ досліду	Витрата, %		Вміст в шкірі,%		Уявна питома вага, г/см^3	Вихід площі шкіри, %**
	ХД	ММТ	Cr_2O_3*	мінеральних речовин*		
1	2,0	0,5	4,2	6,8	0,669	102,1
2	1,75	1	4,2	7,2	0,652	102,8
3	1,5	1,5	4,3	7,4	0,642	104,6
4	1,25	2	4,7	8,0	0,634	106,6
5	1,0	2,5	4,8	8,1	0,632	106,7
6	0,75	3	4,4	8,5	0,637	106,7
7	0,5	3,5	4,3	8,3	0,632	106,4
8	0,5	4	4,3	7,9	0,630	106,2
Контрольна група	1,9	-	4,3	6,4	0,678	100,0

**в перерахунку на абсолютно суху речовину*

*** показник визначався у відношенні показників дослідних зразків до контрольної групи*

Для визначення найбільш раціональних параметрів хромового дублення шкір з використанням МДМ розрахували відносні оптимальні значення межі для показників напівфабрикату у кодових одиницях X_1 = -0,3−0,5; X_2= -0,2 −0,6; X_3 = -1, яким відповідають такі межі функції відгуку, як: масова частка оксиду хрому $Y_н^1$ = 4,25 −4,57 %, температура зварювання $Y_н^2$ = 106,036 −106,946 °С.

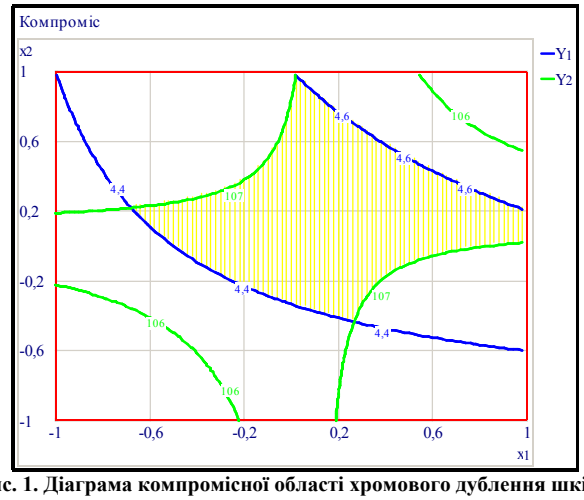


Рис. 1. Діаграма компромісної області хромового дублення шкір з використанням МДМ в кодових одиницях

Враховуючи, що формування структури та якості готових шкір на стадії дублення визначається рядом технологічних особливостей (pH розчину, температура, тривалість, режим обертання барабанів тощо), доцільним є встановлення інтервалу параметрів, що дозволить на практиці своєчасно коригувати виконання технологічного процесу. Отже, згідно компромісної області оптимальними параметрами обробки можна вважати витрати в межах: сполук хрому x_1 = 1−1,5 %; модифікованої дисперсії монтморилоніту x_2=1,9 − 2,3 %; тривалість обробки x_3 = 2 год.

Висновок

Отже, в зв'язку зі створення хромощадної технології виробництва шкіри з сировини ВРХ шляхом застосування модифікованої дисперсії монтморилоніту підчас дублення голини, розроблено математичну модель процесу дублення, яка адекватно описує залежності показників шкіряного напівфабрикату від наступних чинників: витрата хромового дубителя та модифікованої дисперсії монтморилоніту, тривалості обробки.

За рахунок застосування комп'ютерного моделювання встановлено оптимальні параметри процесу

дублення: витрата хромового дубителя 1 − 1,15 %, модифікованої дисперсії монтморилоніту 1,9 − 2,3%, тривалість обробки 2 год.

Експериментальним шляхом доведено, що в результаті проведення хромощадного методу дублення за рахунок застосування модифікованої дисперсії монтморилоніту відбувається збільшення показників виходу по площі готової шкіри, мінеральних речовин та вмісту оксиду хрому, що підтверджує більш ефективне відпрацювання робочих рідин, та краще формування структури дерми.

Література

1. Журавський В. А. Технологія шкіри та хутра : підручник / В. А. Журавський, Е. Є. Касьян, А. Г. Данилкович. – К. : ДАЛПУ, 1996. – 744 с.

2. Інноваційні технології виробництва шкіряних і хутрових матеріалів та виробів : монографія / А. Г. Данилкович, І. М. Грищенко, В. І. Ліщук та ін. ; за ред. А. Г. Данилковича. – К. : Фенікс, 2012. − 344 с.

3. Паламар В. А. Застосування хром-модифікованих дисперсій монтморилоніту для стабілізації колагенової структури дерми / В. А. Паламар, М. О. Марухленко, О. Р. Мокроусова // Східно-європейський журнал передових технологій. – 2015. – № 3. – С. 36–42.

4. Плаван В. П. Вплив комбінованого дублення на перетворення структури колагену дерми / Плаван В. П., Данилкович А. Г. // Вісник КНУТД. – 2009. – № 2. – С. 58–64.

5. Mokrousova O. The organo-mineral composition for retanning –filling of leather semi-finished item / O. Mokrousova : Proceedings of the 3rd Internatioal conference on advanced materials and systems, (Bucharest, Romania, 16th–18th September 2010) / National R&D Institute for Textile & Leather, Division Leather & Footwear Research Institute. – Bucharest : ICPI, 2010. – P. 85–90.

6. Марухленко М. О. Розробка технологічних параметрів хромзбережної технології дублення шкір / М. О. Марухленко, О. Р. Мокроусова, О. А. Охмат // Вісник Хмельницького національного університету. – 2016. – № 2. – С. 258–262.

7. ТМ-7.5-4 «Технологічна методика виробництва шкір різноманітного асортименту для верху взуття і підкладки взуття, галантерейних виробів із шкір великої рогатої худоби та кінських». – К. : ПАТ «Чинбар», 2009. – 11 с.

8. Данилкович А. Г. Практикум по химии и технологи кожи и меха / А. Г. Данилкович, В. И. Чурсин. – М. : ЦНИИКП, 2002. – 413 с.

9. Головтеева А. А. Лабораторный практикум по курсу химии и технологии кожи и меха / А. А. Головтеева, Д. А. Куциди, Л. Б. Санкин. – М. : Легкая индустрия, 1971. – 288 с.

10. Жебентяев А. И. Аналитическая химия. Химические методы анализа : [учеб. пособие] / А. И. Жебентяев, А. К. Жерносек, И. Е. Талуть. − Минск : Новое знание, 2010. – 542 с.

11. Пінчук С. І. Організація експерименту та оптимізація технологічних систем / Пінчук С. І. – К. : Діва, 2008. – 324 с.

12. Радченко С. Г. Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем / С. Г. Радченко. – К. : Політехніка, 2002. – 88 с.

References

1. Zhuravskyi V. A. Tekhnolohiia shkiry ta khutra: pidruchnyk / V. A. Zhuravskyi, E. Ye. Kasian, A. H. Danylkovych. – K. : DALPU, 1996. – 744 s.

2. Innovatsiini tekhnolohii vyrobnytstva shkirianykh i khutrovykh materialiv ta vyrobiv: Monohrafiia / A.H. Danylkovych, I. M. Hryshchenko, V. I. Lishchuk ta in.; za red. A. H. Danylkovycha. — K.: Feniks, 2012. − 344 s.

3. Palamar V. A. Zastosuvannia khrom-modyfikovanykh dyspersii montmorylonitu dlia stabilizatsii kolahenovoi struktury dermy / V. A. Palamar, M. O. Marukhlenko, O. R. Mokrousova // Skhidno-yevropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii. – № 3. – 2015. – S. 36-42.

4. Plavan V. P. Vplyv kombinovanoho dublennia na peretvorennia struktury kolahenu dermy / Plavan V. P., Danylkovych A. H. // Visnyk KNUTD. – 2009. – № 2. – S. 58-64.

5. Mokrousova O. The organo-mineral composition for retanning – filling of leather semi-finished item / O. Mokrousova : Proceedings of the 3rd Internatioal conference on advanced materials and systems, (Bucharest, Romania, 16th–18th September 2010) / National R&D Institute for Textile & Leather, Division Leather & Footwear Research Institute. – Bucharest : ICPI, 2010. – P. 85–90.

6. Marukhlenko M. O. Rozrobka tekhnolohichnykh parametriv khromzberezhnoi tekhnolohii dublennia shkir / M. O. Marukhlenko, O. R. Mokrousova, O. A. Okhmat // Herald of Khmelnytskyi National University. – № 2. – 2016. – C. 258- 262.

7. TM-7.5-4 «Tekhnolohichna metodyka vyrobnytstva shkir riznomanitnoho asortymentu dlia verkhu vzuttia i pidkladky vzuttia, halantereinykh vyrobiv iz shkir velykoi rohatoi khudoby ta kinskykh». – K.: PAT «Chynbar», 2009. – 11 s.

8. Danylkovych A. H. Praktykum po khymyy y tekhnolohy kozhy y mekha / A. H. Danylkovych, V. Y. Chursyn. – M.: TsNYYKP, 2002. – 413 s.

9. Holovteeva A. A. Laboratornyi praktykum po kursu khymyy y tekhnolohyy kozhy y mekha / A. A. Holovteeva, D. A. Kutsydy, L. B. Sankyn. – M. : Lehkaia yndustryia, 1971. – 288 s.

10. Zhebentiaev A. Y. Analytycheskaia khymyia. Khymycheskye metody analyza : [ucheb. posobye] / A. Y. Zhebentiaev, A. K. Zhernosek, Y. E. Talut. − Minsk : Novoe znanye, 2010. – 542 s.

11. Pinchuk S. I. Orhanizatsiia eksperymentu ta optymizatsiia tekhnolohichnykh system / Pinchuk S. I. – K. : Diva, 2008. – 324 s.

12. Radchenko S. H. Matematychne modeliuvannia ta optymizatsiia tekhnolohichnykh system / S. H. Radchenko. K. : Politekhnika, 2002. 88 s.

Рецензія/Peer review : 23.10.2017 р. Надрукована/Printed :01.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Касьян Е.Є.

УДК 544.138

А.Я. ГАНЗЮК, О.І. СТРЕМЕЦЬКИЙ
Хмельницький національний університет

СТРУКТУРНО-СОРБЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ САПОНІТОВИХ ГЛИН, МОДИФІКОВАНИХ ПАР

Вивчено сорбційні властивості природного та модифікованих поверхнево-активними речовинами (ПАР) форм сапоніту по відношенню до різних класів барвників у статичному режимі. З'ясовано, що під час одержання модифікованих форм сапоніту найкращим модифікатором по відношенню до аніонних барвників є катіоноактивні ПАР, хоча приріст питомої адсорбції дещо відстає від приросту маси адсорбенту. Набула подальшого розвитку концепція про доцільність модифікування природних мінеральних сорбентів різними класами ПАР для підвищення їх адсорбційної здатності.

Ключові слова: природний мінеральний сорбент, адсорбція, поверхнево-активні речовини, барвник, модифікація.

A.Y. GANZYUK, O.I. STREMETSKYI
Khmelnytskyi National University

STRUCTURAL-SORPTION CHARACTERISTICS OF SAPONITE CLAYS, MODIFIED SURFACTANTS

Widespread and indispensable growth of natural adsorbents use is caused by the fact that they, having developed specific surface and good (often specific) bleaching peculiarities, are dozens of times cheaper than artificial adsorbents. It leads to simplification of its usage technology – they often exclude the regeneration stage from the scheme. The sorption properties of the natural mineral saponite and its modified forms with surface-active substances (surfactants) have been studied relating to various classes of dyes in static conditions. It has been found that cationic surfactant is the most effective modifier of saponite for obtaining the modified sorbent for the cleaning water from anionic dyes, although the increase of specific adsorption is behind of the growth of the mass of sorbent. In this case the sorption is mainly superficial and results from two mechanisms which are separated in time. The molecules of dye occupy the free active centers on the surface of saponite sorbent for the first 10-20 min then the velocity of adsorption decreases and the sorption continues in the pores of saponite until the sorption equilibration for about one hour. On the basis of research results the authors have suggested the possible mechanisms of organoclay modification. The physical and chemical properties of saponite and sorbents were studied by different modern methods: isotherms of sorption – desorption of nitrogen; thermogravimetric analysis; scanning electron microscopy; X-ray diffraction; atomic absorption spectroscopy; gas chromatography, IR-spectroscopy. The research of physico-chemical and sorption properties of the natural and modified forms of saponite has shown the reasonability of their use for practical purposes in the processes of water treatment, for the cleaning and defecation of wastewater. At the same time the low cost, availability, simple modification technology, high selectivity, simple and effective regeneration of modified saponite were taken into account for the assessment of the producing of sorbents. The concept of the validity of modification of the natural mineral saponite with different classes of surfactants has been further developed to enhance the adsorption capacity of sorbents.

Keywords: natural mineral sorbent, sorption, surfactant, dye, modification.

Вступ

В умовах зростаючої уваги до питань екології все більш актуальною стає проблема збереження навколишнього середовища, а також його відновлення на основі широкомасштабного використання дешевої, доступної, ефективної та екологічно чистої сировини, яка сприяє поліпшенню агрохімічних властивостей ґрунтів і поглинанню різних шкідливих та токсичних речовин. Одним з таких природних утворень є сапонітові глини – новий вид нетрадиційної мінеральної сировини багатогалузевого використання, родовища якого (Варварівське та Ташківське) розвідані на півночі Хмельницької області України.

Ефективна модифікація поверхні органічними сполуками дозволяє значно розширити область застосування природних сорбентів. Так, наприклад, при певних умовах до шаруватих силікатних матеріалів висувається вимога гідрофобності поверхні. Оскільки у звичайному стані більшість шаруватих силікатних матеріалів характеризується більшою чи меншою гідрофільністю, отримати гідрофобну поверхню можна за допомогою обробки її органічними сполуками. Отримання таких органосилікатних комплексів дозволяє використовувати силікатні матеріали в якості наповнювачів полімерних середовищ і пластифікаторів. Відомо, що композиція, яка містить лише 3% органічно-модифікованого природного глинистого матеріалу, характеризується різким збільшенням жорсткості, міцності і бар'єрних властивостей.

Таким чином, метою роботи було проведення дослідження впливу поверхнево-активних речовин різних класів на стан поверхні сапоніту, можливості підвищення його сорбційних властивостей до органічних сполук, які дисоціюють по аніонному типу [1, 2].

Методика експерименту

Дослідження елементного складу природного сапоніту проводили на аналізаторі EXPERT 3L (НВП Інститут аналітичних методів контролю, Київ, Україна). Модифікацію глини Ташківського родовища проведено з використанням поверхнево-активних речовин (ПАР) різних класів: неіоногенна (НПАР) – ПЕГ-4000; аніонактивна (АПАР) – LAS-80; катіонактивна (КПАР) – Барвамід 2К. Морфологію глинистих мінералів вивчали за допомогою електронної мікроскопії. ІЧ спектри пропускання отримували на спектрометрі Thermo Nicolet Nexus FTIR в області 4000-400 $см^{-1}$, зразки змішували з попередньо прожареним KBr (spectroscopy,"Aldrich") у співвідношенні зразок/KBr 1:40.

Оцінка розподілу пор по об'єму та питомої поверхні зразків сапонітових глин природних та

модифікованих ПАР проведена методами БЄТ (BET) Брунауера-Еммета-Теллера (Brunauer-Emmett-Teller) та БДХ (BJH) Баррета-Джойнера-Халенди (Barret-Joyner-Halenda). Рентгенографічний аналіз використали для визначення основних адсорбуючих мінералів та їх кількісного складу.

Для оцінки термохімічних перетворень, що відбуваються у системі сапоніт- ПАР, проведено термічні дослідження цієї системи, які включають диференційно-термічний та термогравіметричний аналізи. При цьому визначено енергетичні зміни у досліджуваних зразках сапонітових глин та встановлено температурні інтервали перетворень: підвищення точності визначення температур перетворення здійснювали шляхом попереднього запису базисної лінії при нагріванні. Температури початку перетворення визначали за відхиленням кривих ДТА від базисної лінії з врахуванням зміни їх положення.

Результати експерименту

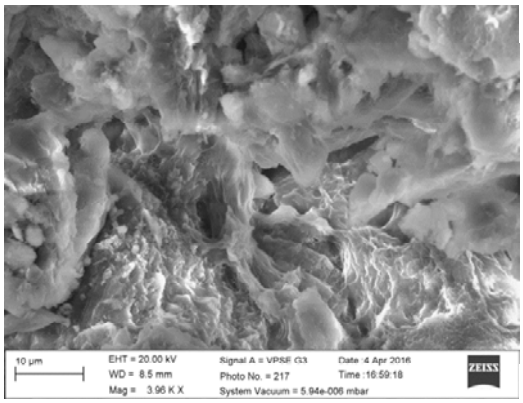
Хімічний склад сапонітової породи та модифікованих зразків наведений в табл. 1.

Таблиця 1

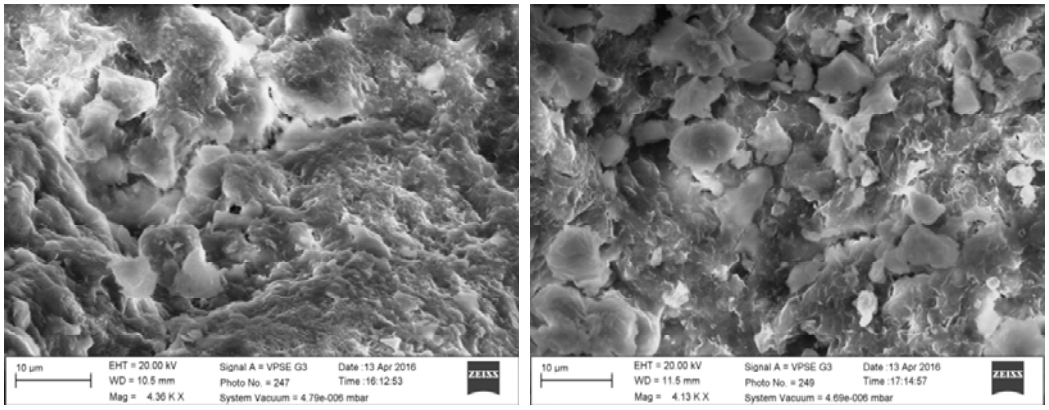
Хімічний склад сапонітової породи

№	Хімічний склад	природний	модифікований КПАР	модифікований АПАР	модифікований НПАР
		%			
1	SiO_2	55,594	54,353	54,238	55,237
2	Fe_2O_3	17,007	17,297	18,778	18,158
3	Al_2O_3	14,978	14,474	14,143	13,643
4	MgO	9,301	7,366	7,453	7,193
5	CaO	3,767	4,146	3,876	3,338
6	TiO_2	1,639	1,920	1,977	1,996
7	MnO_2	0,349	0,310	0,332	0,321
8	V_2O_5	0,126	0,134	0,138	0,114

Елементи-домішки в сапонітовій глині представлені (%): Zn – 0,12; Cr – 0,005; Li – 0,002; Ba, V, Ni по 0,0015; Cu, Zn, La по 0,0014; Sc, Ga по 0,0007; Pb – 0, 0005. Фізико-хімічні властивості сапоніту: зовнішня питома поверхня (для фракції 0,053 мм) -1037,1 - 1079,7 $м^2$/кг; здатність до набухання – 2,0 %; колоїдність – 11,7-12,7%; ємність катіонного обміну – 54,8 мг-екв. на 100 г.

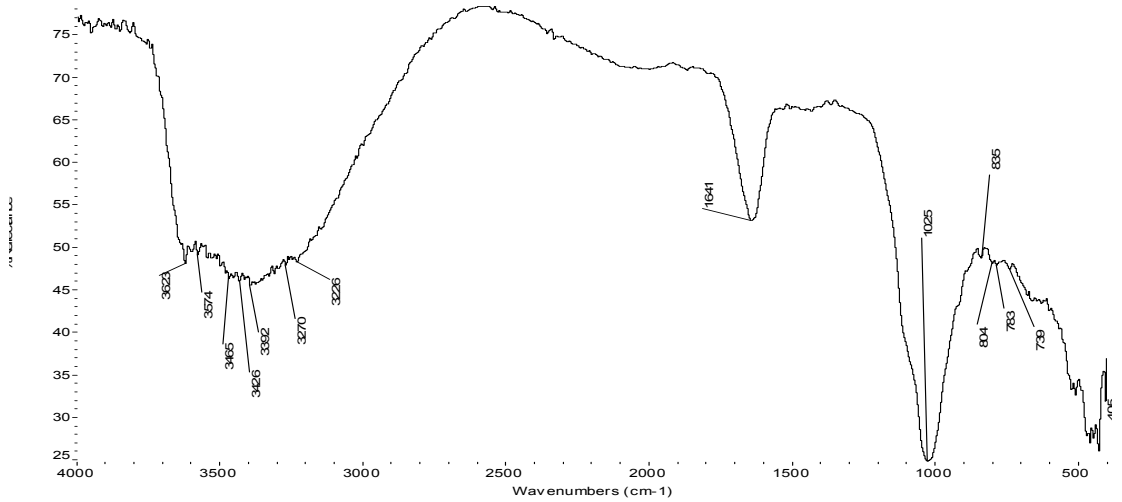


а)

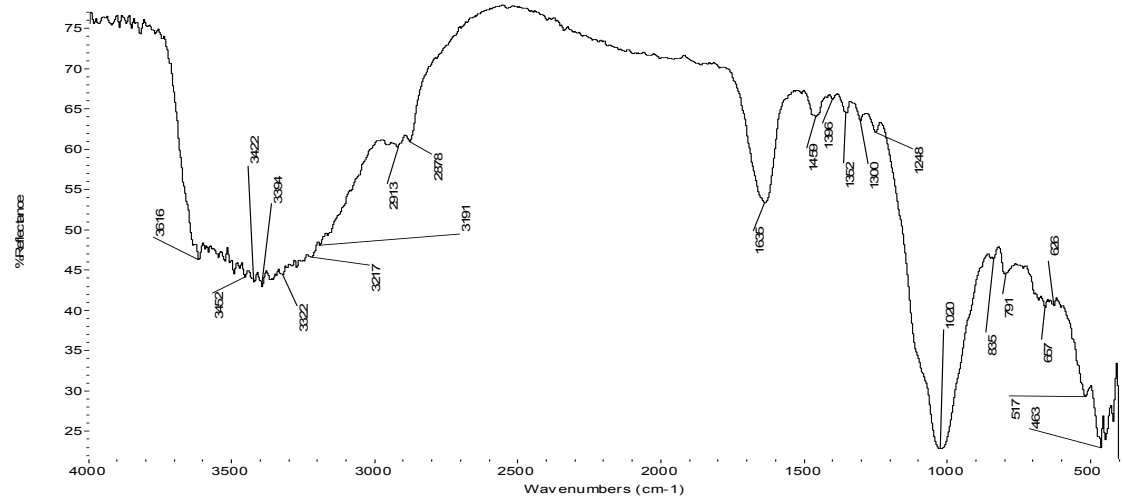


б) в)

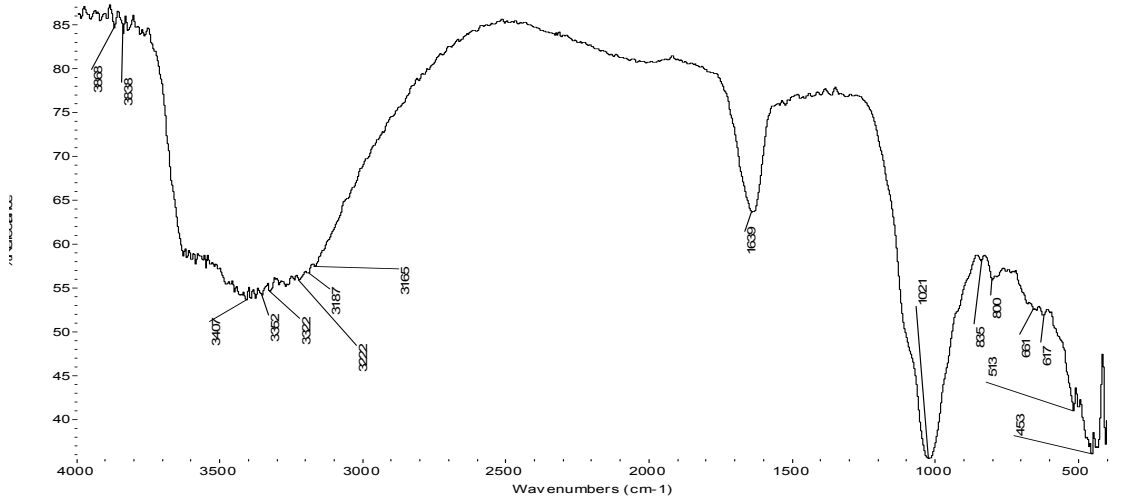
Рис. 1. Мікрофотографії СЕМ зразків сапоніту: а) природний; б) модифікований Барвамід; в) модифікований ПЕГ-4000



а)



б)



в)

Рис. 2. ІЧ спектри пропускання зразків: а) природного сапоніту; б) модифікованого ПЕГ- 4000; в) модифікованого Барвамідом

Дослідження показали, що після модифікації ПАР спостерігається підвищення сорбційної здатності по відношенню до аніонних барвників. Найвища сорбційна здатність проявляється при застосуванні в якості модифікаторів КПАР – в 2,4 рази порівняно з природним сапонітом; при використанні АПАР та НПАР – в 1,9 разів. При проведенні адсорбції з водних розчинів барвників катіонного типу також спостерігається незначне підвищення сорбційної здатності в 1,4 рази. Природний сапоніт є більш ефективним сорбентом по

відношенню до катіонних барвників, оскільки поверхня частинок сапоніту має негативний заряд, який не скомпенсований в структурі мінералу катіоном-замісником. Рівновага наступає при концентрації розчину 0,04 ммоль/л, максимальна адсорбція складає 0,0699 ммоль/г. Дослідження кінетики адсорбції прямого яскраво-оранжевого на зразках сапоніту, свідчать про те, що цей природний мінерал не є ефективним сорбентом по відношенню до барвників, які дисоціюють по аніонному типу, що є ознакою його селективності. Після проведення модифікації спостерігається підвищення ступеня адсорбції барвника не більше, ніж на 5%. В перші 10 – 20 хвилин молекули барвника займають вільні активні центри на поверхні сапонітової глини, після чого швидкість процесу знижується і починається адсорбція в порах сапоніту, де і проходить до встановлення сорбційної рівноваги, для чого достатньо близько однієї години. На електронно-мікроскопічних знімках (рис. 1) зображено характерну морфологію для даного глинистого мінералу, яка представлена шаруватою структурою у вигляді дисперсних плитчастих частинок. Для зразка природного сапоніту характерна структура більш аморфно-желеподібної маси, після модифікації ПАР спостерігається виражене розшарування на пластинки невизначеної форми.

На ІЧ спектрах природних сорбційних матеріалів та їх модифікованих форм можна відзначити характер взаємодії їх активних центрів з молекулами води і поверхнево-активними центрами адсорбент-адсорбат. Вміст адсорбованої води можна визначити по смузі 1630 $см^{-1}$, і, як видно з рис. 2, в сапоніті, модифікованому ПАР, відбувається зменшення смуги деформаційних коливань молекул сорбованої води, що вказує на видалення відповідної кількості гідрофільних домішок. Смуга поглинання 1020 $см^{-1}$ характеризує симетричні коливання Si–O–Al валентних груп. Для зразка сапоніту, модифікованого ПЕГ-4000, характерна смуга 3500 $см^{-1}$, яка описує валентні коливання груп O–H, пов'язаних міжмолекулярними водневими зв'язками. Проте, варто відмітити, що ІЧ спектр поглинання сапонітової породи, модифікованої Барвамідом, містить характеристичну смугу поглинання 1640 $см^{-1}$, що доводить наявність первинних амідів та деформаційні коливання N–H зв'язків [3, 4].

Багато процесів, в яких беруть участь тверді тіла, залежать не тільки від їх хімічної природи, але і від розвиненості їх поверхні і структури пор. Так, при використанні твердих тіл в якості адсорбентів газів і парів, їх питома поверхня є найбільш важливим параметром, що характеризує адсорбційні властивості при низьких і середніх відносних тисках. Методами БЄТ та БДХ проведена оцінка розподілу пор по об'єму та питомої поверхні зразків сапонітових глин природних та модифікованих ПАР, результати якої наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Параметри пористої структури природного сапоніту та модифікованого різними класами ПАР за даними низькотемпературної адсорбції/десорбції азоту

Проба		Питома поверхня S, $м^2/г$						
		BET	BJH ad/de	DH ad/de	t_{ext}	t_{mic}	DR	DFT
1	Природний	47	22,37/ 68,50	22,74/ 70,24	31,14	16,57	78,50	47,16
2	ПЕГ-4000	28	14,08/ 45,52	14,32/ 46,71	19,82	78,52	28,22	29,49
3	Барвамід	35	19,23/ 55,61	19,54/ 57,05	26,38	9,06	38,74	37,51

Проба		Об'єм пор V, $см^3/г$							
		total	BJH ad/de	DH ad/de	t_{mic}	DR	HK	SF	DFT
1	Природний	0,1336	0,1198/ 0,1414	0,1165/ 0,1389	0,0084	0,0280	0,028	0,021	0,117
2	ПЕГ-4000	0,0795	0,0718/ 0,086	0,0699/ 0,0845	0,0041	0,0100	0.017	0,012	0.069
3	Барвамід	0,1080	0,0099/ 0,116	0.0968/ 0,1137	0,0049	0,0138	0,0215	0,016	0,094

Проба		Діаметр пор, Å							
		Aver	BJH ad/de	DH ad/de	DR	DA	HK	SF	DFT
1	Природний	55, 99	15,46/ 21,43	15,46/ 21,43	11,68	8,7	2,158	3,784	26,42
2	ПЕГ-4000	57,44	15,52/ 21,39	15,52/ 21,39	8,585	8,1	2,158	3,738	27,42
3	Барвамід	61,41	15,51/ 21,40	15,51/ 21,40	8,780	8,3	2,158	3,784	27,42

Отримані ізотерми відносяться до IV типу: вони асоціюються з капілярною конденсацією в

мезопорах, яка характеризується збільшеною крутизною при підвищеному відносному тиску. Початкова ділянка цієї ізотерми аналогічна ізотермі II типу. Таким чином, за даними низькотемпературної адсорбції/десорбції азоту констатовано зменшення питомої поверхні сапоніту після модифікації ПЕГ-4000 у 1,7 рази та Барвамідом – у 1,3 разів за методом БЄТ, за методом ДР – в середньому у 2,8 разів. Загальний об'єм пор зменшується у 1,4 рази, зате середній діаметр пор зростає на 10%. Так як досліджуваний природний сорбційний матеріал є мікромезопористим, то доцільно звернути увагу на результати вищевказаних показників за t-методом Хєлсі, згідно якого питома поверхня зростає від 16,57 до 78,52 $м^2/г$ (для сапоніту, модифікованого ПЕГ-4000), а об'єм пор зменшується від 0,0084 до 0,0041 $см^3/г$. Петлі гістерезису належать до А типу, що характеризує пори циліндричної форми [5, 6].

За результатами рентгенографічного аналізу визначено основні адсорбуючі мінерали та їх кількісний склад: дослідження піків підтвердили що порода складається з мінералів з три- і діоктаедричною структурою. Таким чином, методом рентгенографічного аналізу доведено, що зразки сапонітової глини є напіваморфними та до їх складу входить кварц, сапоніт (магнієвий монтморилоніт), гематит з великим вмістом заліза, анатаз, Ti (IV) оксид, що рівномірно розподілений по всій масі мінералу, калій у складі іллиту, галузит, нонтроніт та сліди кальциту.

Термічні криві (ДТА, ДТГ, ТГ) природного сапоніту і модифікованого ПЕГ-4000 та Барвамідом наведені на рис. 3. Криві ДТА дають можливість визначити і ідентифікувати реакції, які протікають в глинах при термічній деструкції, як перегрупування та утворення поперечних зв'язків і виявити незначні зміни в складі сапонітової породи, або наявність замісників в основному ланцюгу. Це може бути корисним для дослідження механізму термічної деструкції. Дані ДТА свідчать про те, що за низьких температурах (від 80 до 250 ºС) відбувається ендотермічний процес з вилученням вологи із зразка.

Наступний екзотермічний процес пов'язаний з дегідратацією за рахунок вільних ОН-груп, що є характерним для сапоніту, модифікованого ПЕГ-4000. Потім при 250 ºС починається процес кристалізації, який закінчується за різних температур: в природному зразку сапонітової породи – при температурах 250 та 600 ºС, а модифікованого ПЕГ- 4000 та Барвамідом – 250 і 570 ºС. Крива ДТГ сапоніту, модифікованого неіоногенною поверхнево-активною речовиною, має два характерні ендопіки, на відміну від природного та модифікованого катіоноактивним ПАР, що, можливо, характеризує процеси деструкції речовин, отриманих модифікацією. Площа піка при деструкції природного зразка сапонітові глини, значно більша аналогічної площі зразка породи, модифікованої різними класами ПАР, що свідчить про те, що для руйнування зв'язків в органомінералі треба витратити значно більшу енергію. Максимальна швидкість перетворення і втрата маси в модифікованих зразках, менша, ніжу природному [7, 8].

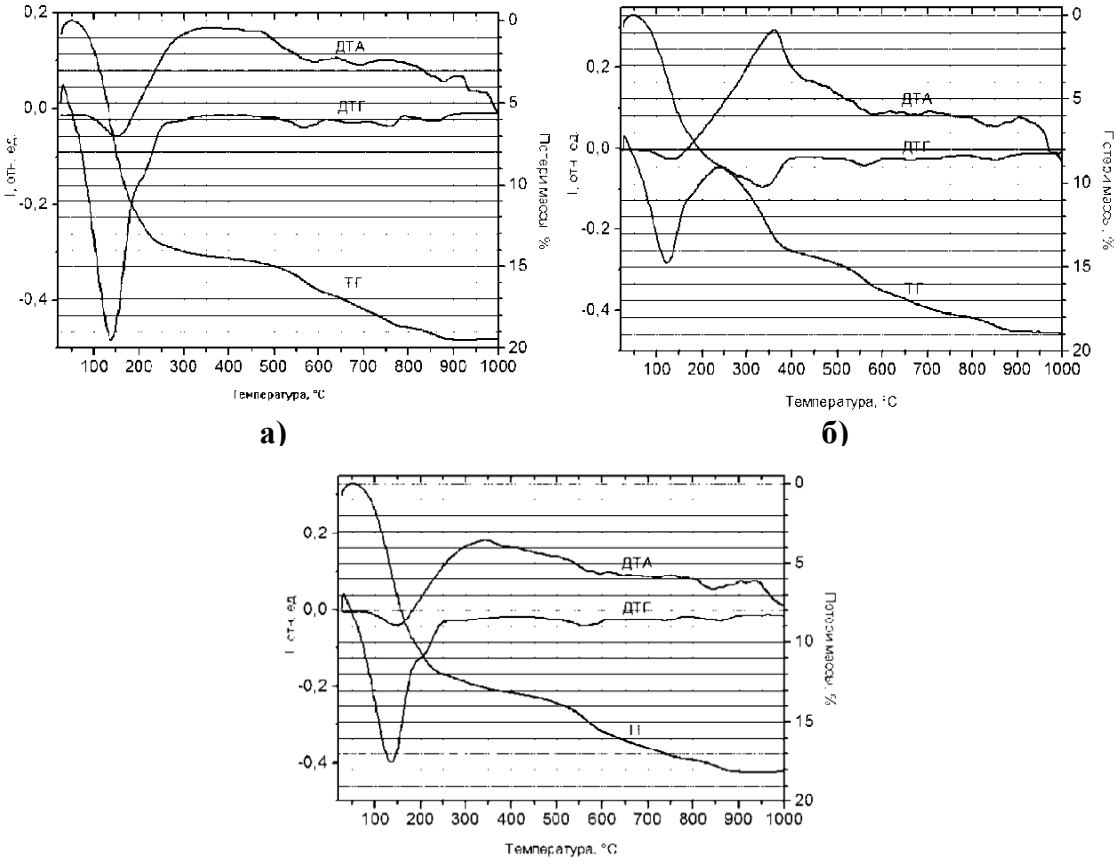


Рис. 3. Термічні криві ДТА, ДТГ (ліва вісь) та ТГ (права вісь):
а) природного сапоніту; б) модифікованого ПЕГ-4000; в) модифікованого Барвамідом

Таким чином, результати проведених термічних досліджень показали, що модифікація природних сорбційних матеріалів поверхнево-активними речовинами суттєво впливає на показники термостійкості і процеси деструкції в системі сапоніт – ПАР.

Висновки

Проведені дослідження структурно-сорбційних властивостей природних і модифікованих форм сапонітових глин показали доцільність його застосування в якості сорбенту для очищення стічних вод від органічних сполук, а саме барвників катіонного та аніонного типів. При цьому його перевагами є дешевизна, доступність, нескладна технологія модифікування, висока вибірковість, можливість проведення простої та ефективної регенерації. Одержані результати можуть бути використані у подальших наукових дослідженнях про органоглини.

Література

1. Ганзюк А. Модифікація сапонітових глин поверхнево-активними речовинами / А. Ганзюк, С. Карван, Г. Дейчук, Х. Ганзюк // Вісн. Львів. ун-ту. Сер. хім. – 2015. – Вип. 56 (ч. 1). – С. 186–191.

2. Karvan S.A., Ganzyuk A.Y. The Role of Natural Sorbent in Water Treatment Process // Abstracts of 13th EuCheMS International Conference on Chemistry and the Environment ETH Zurich. Switzerland.11–15 Sept. 2011. P. 250.

3. Экспериментальные методы в адсорбции и газовой хроматографии / под. ред. А.В. Киселева, В.П. Древинга. – М. : Издательство МГУ, 1973. – 448 с.

4. Sprynskyy M. Heterogeniczność strukturalna oraz właściwości adsorpcyjne adsorbentów naturalnych // Monografie Wydziału Chemii. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika. Toruń. 2012. P. 17–18.

5. Адамова Л.В. Сорбционный метод исследования пористой структуры наноматериалов и удельной поверхности наноразмерных систем : учебное пособие / Л.В. Адамова, А.П. Сафронов. – Екатеринбург : ИОНЦ «Нанотехнологии и перспективные материалы», 2008. – 62 с.

6. Вячеславов А.С. Измерение площади поверхности и пористости методом капиллярной конденсации азота : Методическая разработка / А.С. Вячеславов Е.А. Померанцева. – М. : Издательство МГУ, 2006. – 55 с.

7. Співак В.В. Українські дисперсні мінерали в процесах очистки стічних вод / В.В. Співак, М.М. Бабчук, І.М. Астрелін, О.Ф. Алексєєв // ІІ-й Всеукраїнській з'їзд екологів з міжнародною участю. Збірник наукових статей. – Вінниця, 2009. – С. 52–55.

8. Трифонова М. Ю. Структурно-сорбционные свойства природных и модифицированных катионными ПАВ слоистых силикатов с жесткой структурной ячейкой / М. Ю. Трифонова, Ю. И. Тарасевич, С. В. Бондаренко, С. А. Доленко, З. Г. Иванова, А. И. Жукова // Химия и технология воды. – 2008. – 30, № 3. – С. 293–303.

References

1. Hanziuk A. Modyfikatsiia saponitovykh hlyn poverkhnevo-aktyvnymy rechovynamy / A. Hanziuk, S. Karvan, H. Deichuk, Kh. Hanziuk // Visn. Lviv. un-tu. Ser. khim. – 2015. – Vyp. 56 (ch. 1). – S. 186–191.

2. Karvan S.A., Ganzyuk A.Y. The Role of Natural Sorbent in Water Treatment Process // Abstracts of 13th EuCheMS International Conference on Chemistry and the Environment ETH Zurich. Switzerland.11–15 Sept. 2011. P. 250.

3. Eksperimentalnye metody v adsorbtsii i hazovoi khromatohrafii / pod. red. A.V. Kyseleva, V.P. Drevynha. – M. : Yzdatelstvo MHU, 1973. – 448 s.

4. Sprynskyy M. Heterogeniczność strukturalna oraz właściwości adsorpcyjne adsorbentów naturalnych // Monografie Wydziału Chemii. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika. Toruń. 2012. P. 17–18.

5. Adamova L.V. Sorbtsionnyi metod issledovania poristoi struktury nanomaterialov i udelnoi poverkhnosti nanorazmernykh sistem : uchebnoe posobie / L.V. Adamova, A.P. Safronov. – Ekaterynburh : YONTs «Nanotekhnolohyy y perspektyvnыe materyalы», 2008. – 62 s.

6. Viacheslavov A.S. Izmerenie ploshchadi poverkhnosti i poristosti metodom kapilliarnoi kondensatsii azota : Metodicheskaia razrabotka / A.S. Viacheslavov E.A. Pomerantseva. – M. : Yzdatelstvo MHU, 2006. – 55 s.

7. Spivak V.V. Ukrainski dyspersni mineraly v protsesakh ochystky stichnykh vod / V.V. Spivak, M.M. Babchuk, I.M. Astrelin, O.F. Aleksieiev // II-y Vseukrainskii zizd ekolohiv z mizhnarodnoiu uchastiu. Zbirnyk naukovykh statei. – Vinnytsia, 2009. – S. 52–55.

8. Tryfonova M. Yu. Strukturno-sorbtsionnye svoistva pryrodnykh i modifitsirovannykh kationnymi PAV sloistyh silikatov s zhestkoi strukturnoi yacheikoi / M. Yu. Tryfonova, Yu. Y. Tarasevych, S. V. Bondarenko, S. A. Dolenko, Z. H. Yvanova, A. Y. Zhukova // Himia y tehnolohyia vody. – 2008. – 30, 3. – S. 293–303.

Рецензія/Peer review : 17.11.2017 р. Надрукована/Printed :06.12.2017 р.
Рецензент: д.с.- г., доц. кафедри екології Міронова Н.Г.

УДК 675.046

О.В. КОНДРАТЮК, Е.Є. КАСЬЯН
Київський національний університет технологій та дизайну

РОЗРОБКА СКЛАДІВ ПОКРИВНИХ КОМПОЗИЦІЙ ДЛЯ ОЗДОБЛЕННЯ НАТУРАЛЬНИХ ШКІР

У статті наводяться результати досліджень впливу компонентів покривних композицій на основі модифікованих акрилових і уретанових плівкоутворювачів на показники полімерних плівок. За допомогою симплексно-решіткового методу математичного планування експерименту визначено раціональні склади покривних композицій для отримання покривних плівок з високими фізико-механічними показниками і водостійкістю, що можуть бути використані для компонування складів покривних фарб різних видів оздоблення залежно від асортименту готових шкір. Шляхом регресійного аналізу моделей вихідних змінних отримано раціональні співвідношення компонентів полімерних композицій, за яких забезпечуються необхідні показники технологічних властивостей модифікованих полімерних плівок. Показано, що такі раціональні співвідношення компонентів дають змогу сформувати полімерні плівки з високими фізико-механічними показниками та водостійкістю, які можуть бути використані для компонування складів покривних фарб різних видів оздоблення залежно від асортименту готових шкір.

Ключові слова: акрилові й уретанові плівкоутворювачі, модифікація, екзополіакриламід, структуруючий агент.

O.V. KONDRATIUK , E.E. KASYAN
Kyiv National University of Technologies and Design

PROPERTIES OF MODIFIED POLYMER COMPOSITIONS FOR LEATHER FINISHING

The article presents the results of investigations of the influence of components of coating compositions on the basis of modified acrylic and urethane film formers on the parameters of polymer films. Using the simplex-lattice method of mathematical planning of the experiment, the rational compositions of the coating compositions have been determined to obtain coating films with high physico-mechanical parameters and water resistance, which can be used for composing coatings of coating paints of different types depending on the range of finished leather

By the regression analysis of the models of the initial variables, rational proportions of the components of the polymer compositions are obtained, in which the necessary parameters of the technological properties of the modified polymer films are provided. It is shown that such rational components of the components make it possible to form polymer films with high physical and mechanical parameters and water resistance, which can be used for the composition of coatings of coating paints of different types depending on the range of finished leather.

It has been found that the modified polyacrylic composition should be used for the formation of soft and viscous lower coat layers, and the more rigid urethane polymer - in its upper layers. A modified urethane composition with high strength, elongation and water resistance can be used for aniline finish, and a mixture of acryl urethane with the addition of pigment materials - for compact emulsion finish. Also, by changing the ratio of components of modified polymeric compositions, the regulation of the properties of the coating films is ensured, depending on the destination of the finished product..

Keywords: acrylic and urethane film formers, modification, exopolyacrylamide, structuring agent.

Вступ

Процеси оздоблення відіграють дуже важливу, майже вирішальну роль у розширенні та оновленні асортименту шкіряної продукції. Покривне фарбування, що поєднує комплекс хімічних, фізико-хімічних та механічних впливів на шкіру, є головним процесом заключного оздоблення і спрямоване на забезпечення високих експлуатаційних, гігієнічних і естетичних показників покриття. До експлуатаційних показників покриття відносять адгезію, стійкість до механічних і атмосферних впливів та тривале збереження цих показників у процесі експлуатації готових виробів. При розробці складу покривних композицій також необхідно враховувати фізико-механічні і фізико-хімічні властивості самих покривних плівок, особливо їх еластичність і міцність, а також волого- і водостійкість.

Нанесення покривної плівки на шкіряний напівфабрикат – основний засіб для одержання якісного колірного тону, що значною мірою визначає асортимент шкіри. Тому саме покривне фарбування частіше за інші процеси шкіряного виробництва піддається змінам і удосконаленню. На сьогодні найбільшим попитом користуються еластичні шкіри з натуральною лицьовою поверхнею анілінового й напівanілінового оздоблень, тобто шкіри з тонким покриттям, що виконує естетичні й захисні функції та дозволяє зберегти натуральний гриф шкіри і її неповторність.

Для виготовлення шкіри анілінового й напівanілінового оздоблень необхідний високоякісний напівфабрикат, що не має помітних лицьових дефектів, і рівномірно пофарбований у барабані. При наявності незначних дефектів фарбування з метою їх маскування в оздоблювальні композиції додають барвники або використовують забарвлені плівкоутворювачі [1].

Однак, враховуючи те, що шкіряні підприємства в більшості переробляють крупну сировину важких мас, що має значну кількість лицьових дефектів, с***а***ме емульсійне оздоблення, найважливішим завданням якого визначають маскування чи нівелювання наявних лицьових дефектів, є традиційно найбільш поширеним способом формування покриття на шкірі. Для ефективного проведення емульсійного оздоблення необхідно використовувати нові ефективні оздоблювальні матеріали, здатні забезпечити формування покриття на шкірі з високими показниками якості [2].

Аналіз останніх досліджень

Емульсійне оздоблення полягає у формуванні на лицьовій поверхні шкіряного напівфабрикату багатошарового непрозорого покриття, здатного маскувати присутні на поверхні напівфабрикату дефекти. Застосування акрилових і уретанових композицій для емульсійного оздоблення дозволяє поєднати позитивні властивості кожного компонента і отримати необхідні для оздоблення шкіряного напівфабрикату плівкоутворювальні матеріали, які б володіли перевагами окремих складових, тобто формували покриття з високими, як у поліуретанів, фізико-механічними й термодинамічними характеристиками та задовольняли, як поліакрилати, хорошим гігієнічним властивостям покривних плівок [3].

Хімічна модифікація існуючих полімерних плівкоутворювачів шляхом їх структурування, тобто введення в структуру певної кількості активних груп з утворенням зшивок між ланцюгами лінійних полімерів, дозволяє змінювати фізико-механічні та фізико-хімічні показники полімерних плівок і, таким чином, забезпечує отримання покриття на шкірі з необхідними технологічними та експлуатаційними характеристиками [4].

В роботах [5, 6] показана ефективність модифікації акрилових і акрилоуретанових плівкоутворювачів препаратом екзополіакриламідом (ЕПАА) [7] та структуруючогим агентом основним сульфатом хрому (ОСХ), застосування котрих сприяє покращанню фізико-механічних, реологічних і гідрофільних властивостей та експлуатаційних характеристик покривних плівок. Використання у полімерних композиціях препаратів ЕПАА і ОСХ сприяє зміцненню модифікованих полімерних плівок, що полягає у помітному зростанні їх модуля еластичності, межі міцності при розтягуванні і зменшенні відносного видовження при розриві. Також використання препаратів ЕПАА і ОСХ значно покращує водостійкість індивідуальних та композиційних полімерних матеріалів.

Постановка завдання дослідження

Надалі постає питання розробки складів модифікованих покривних композицій та параметрів процесу покривного фарбування з використанням даних матеріалів. Тому *метою* дослідження є визначення впливу компонентів полімерної композиції на фізико-механічні і фізико-хімічні властивості самих покривних плівок та розробка на основі цих даних складів покривних композицій на базі модифікованих полімерів.

Об'єкти та методи дослідження

В дослідженнях для створення покривних композицій використано плівкоутворювачі – акриловий МБМ-3 та уретановий СЗПУ-7 АТЗ . Ці матеріали мають хороші плівкоутворювальні властивості та змішуваність з іншими компонентами покривних фарб. Модифікування плівкоутворювачів і покривних плівок проведено з використанням екзополіакриламіду ЕПАА [8] та основного сульфату хрому ОСХ.

Досліджувані полімерні плівки формували на тефлоновій підкладці за стандартною методикою [9]. Фізико-механічні дослідження одержаних плівок проводили на розривній машині РМУ-5 при швидкості нижнього затискача 50 мм/хв за методикою [9]. У якості показників досліджень полімерних плівок служили умовний модуль еластичності при 100-відсотковому видовженні і температурі 20 ºС, межа міцності при розтягуванні та відносне видовження при розриві. Набухання досліджуваних плівок у воді протягом 3 год визначали за методикою [9].

Для визначення впливу компонентів покривних композицій на властивості покриття застосовано симплексно-решітковий метод математичного планування експерименту, зокрема D-оптимальний план Кіфера, у якому досягається зменшення об'єму еліпсоїду розсіювання оцінок коефіцієнтів рівняння регресії [10].

Симплексно-решіткові плани забезпечують рівномірне розміщення експериментальних точок по (q-1)-мірному симплексу. Такі плани призначені для вивчення сумішевих композицій, властивості яких залежать лише від співвідношення компонентів. У цьому випадку виконується умова

$$\sum_{i=1}^{n} x_i = 1, \tag{1}$$

де $x_i \geq 0$ – концентрація компонента; n – кількість компонентів.

В якості моделі для трьохкомпонентної суміші обрано поліном третього порядку:

$$\begin{aligned} y = {} & \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \gamma_{12} x_1 x_2 (x_1 - x_2) + \\ & + \gamma_{13} x_1 x_3 (x_1 - x_3) + \gamma_{23} x_2 x_3 (x_2 - x_3) + \beta_{123} x_1 x_2 x_3; \end{aligned} \tag{2}$$

де x_i – концентрація компонентів; β_i, β_{ij}, γ_{ij}, β_{jk} – відповідні коефіцієнти поліному, причому $1 \leq (i, j,k) \leq 3$; $i \neq j \neq k$.

Після визначення коефіцієнтів рівняння регресії проводиться статистичний аналіз отриманих результатів та перевіряється адекватність моделі. Симплексно-решіткові плани є насиченими, тому для оцінки адекватності отриманих моделей проводять досліди в додаткових контрольних точках. Адекватність моделей визначається за допомогою критерію Стьюдента [10, 11]. Отримані моделі дають можливість виявити вплив кожного компонента системи на властивості всієї системи. Визначення оптимального складу полімерної композиції можна здійснити графічним методом за кривими рівних значень властивостей на площині правильного симплексу. Розрахунок коефіцієнтів регресії, перевірки їх значимості та адекватності отриманих рівнянь, розрахунок значень вихідних змінних при оптимізації виконано з використанням комп'ютерної програми *Statistica 6.1* [12].

Результати та їх обговорення

При вивченні властивостей композиції, що залежать лише від співвідношення компонентів,

факторний простір являє собою правильний симплекс [10]. Для таких систем виконується співвідношення (1), коли сума відносних концентрацій усіх компонентів суміші дорівнює одиниці. При цьому відносна концентрація кожного компонента змінюється від 0 до 1, тобто в межах 0...100 %.

До складу модифікованих полімерних композицій окрім досліджуваних акрилового й уретанового плівкоутворювачів входять препарати ЕПАА і ОСХ. Як видно з попередніх досліджень [5], модифікуючий вплив препарату ЕПАА на оброблені ним плівки більшою мірою залежить від твердості полімеру і дещо менше від природи плівкоутворювача. Також внаслідок гідрофільності препарат екзополіакриламід сприяє істотному обводненню полімерних плівок, що потребує застосування структуруючих агентів, здатних блокувати частину активних груп препарату та утворювати додаткові хімічні чи фізико-хімічні зв'язки в полімері. Дослідження показали, що надмірний вміст препаратів ЕПАА і ОСХ в полімерних композиціях спричиняє значне зростання жорсткості плівок, тому вміст препаратів у композиціях має бути обмеженим.

Враховуючи результати попередніх досліджень, обрано наступні концентрації компонентів у досліджуваних композиціях у межах: ЕПАА – (x_1) – 0…10 %, ОСХ – (x_2) – 0…5 %, полімер – (x_3) – 0…100 %. В якості функцій відгуку вибрано наступні показники покривних плівок: Y_1 – модуль еластичності при 100 %-му видовженні, МПа; Y_2 – межа міцності при розтягуванні, МПа; Y_3 – відносне видовження при розриві, %; Y_4 – набухання плівок у воді, %.

Отже, при наявності обмежень зміни концентрацій деяких компонентів (препаратів ЕПАА і ОСХ) в суміші локальна область на діаграмі являє собою неправильний симплекс. У цьому випадку проводять перенормування і склади в вершинах локального симплекса приймають за псевдокомпоненти (q_1, q_2, q_3) так, щоб виконувалась умова (1). Планування експерименту і отримання його математичної моделі виконують у системі координат псевдокомпонентів. Для проведення експерименту здійснюють перехід від псевдокомпонентів q_i до початкових компонентів x_i.

Відповідно до поставленої мети проведено дослідження трьох модифікованих полімерних композицій на базі окремих плівкоутворювачів МБМ-3 (*композиція I*), СЗПУ-7 АТЗ (*композиція II*) та полімерної композиції МБМ-3 : СЗПУ-7 АТЗ = 1:1 (*композиція III*). Для кожної композиції згідно з планом експерименту і значеннями функцій відгуку (табл. 1) отримано моделі вихідних змінних та проведено їх аналіз.

Таблиця 1

Характеристика плану

Номер досліду	План						Композиція I			
	q_1	q_2	q_3	x_1	x_2	x_3	Y_{I-1}	Y_{I-2}	Y_{I-3}	Y_{I-4}
1	1	0	0	10	0	90	0,68	5,31	990	133,5
2	0	1	0	0	5	95	0,94	5,24	1070	18,9
3	0	0	1	0	0	100	0,18	2,45	1650	25,1
4	0,7236	0,2764	0	7,236	1,382	91,382	1,22	5,77	870	43,4
5	0,2764	0,7236	0	2,764	3,618	93,618	1,12	6,22	930	19,0
6	0,7236	0	0,2764	7,236	0	92,764	0,57	4,23	1050	127,5
7	0,2764	0	0,7236	2,764	0	97,236	0,27	2,65	1370	39,3
8	0	0,7236	0,2764	0	3,618	96,382	0,74	4,42	1210	17,3
9	0	0,2764	0,7236	0	1,382	98,618	0,38	3,35	1360	20,4
10	0,3333	0,3333	0,3334	3,333	1,667	95,00	0,54	3,93	1130	25,7

Номер досліду	Композиція II				Композиція III			
	Y_{II-1}	Y_{II-2}	Y_{II-3}	Y_{II-4}	Y_{III-1}	Y_{III-2}	Y_{III-3}	Y_{III-4}
1	2,28	4,67	770	44	1,48	5,12	850	84,3
2	1,85	3,12	780	5,2	1,24	5,27	960	10,8
3	0,73	1,5	1070	6,7	0,46	1,98	1345	14,3
4	2,63	5,17	690	22,3	2,88	6,57	890	29,8
5	2,48	3,85	780	10,4	2,54	5,64	1000	12,4
6	1,95	3,73	800	31,5	1,15	3,95	940	66,5
7	0,97	1,76	970	13,7	0,62	2,28	1240	22,5
8	1,75	2,92	840	5,8	1,06	3,42	1080	10,4
9	1,12	2,37	930	6,4	0,72	2,53	1200	12,1
10	1,88	2,97	835	12,3	2,27	4,86	1090	16,0

Отримані моделі вихідних змінних для всіх трьох полімерних композицій мають вигляд:

$$Y_{I-1} = 0{,}68\,q_1 + 0{,}94\,q_2 + 0{,}18\,q_3 + 1{,}8\,q_1 q_2 - 0{,}05\,q_1 q_3 + 1{,}21\,q_1 q_2 (q_1 - q_2) + 0{,}43\,q_1 q_3 (q_1 - q_3) + 0{,}11\,q_2 q_3 (q_2 - q_3) - 6{,}87\,q_1 q_2 q_3$$

$$Y_{I-2} = 5{,}31\,q_1 + 5{,}24\,q_2 + 2{,}45\,q_3 + 3{,}6\,q_1 q_2 - 2{,}2\,q_1 q_3 + 0{,}2\,q_2 q_3 - 2{,}69\,q_1 q_2 (q_1 - q_2) + 1{,}68\,q_1 q_3 (q_1 - q_3) - 0{,}99\,q_2 q_3 (q_2 - q_3) - 15{,}69\,q_1 q_2 q_3$$

$Y_{I-3} = 990\ q_1 + 1070\ q_2 + 1650\ q_3 - 650\ q_1 q_2 - 550\ q_1 q_3 - 375\ q_2 q_3 - 135{,}4\ q_1 q_2 (q_1-q_2) - 138{,}9\ q_1 q_3 (q_1-q_3) + 611{,}4\ q_2 q_3 (q_2-q_3) + 1845{,}2\ q_1 q_2 q_3$

$Y_{I-4} = 133{,}5\ q_1 + 18{,}9\ q_2 + 25{,}1\ q_3 - 223\ q_1 q_2 + 20{,}5\ q_1 q_3 - 15{,}75\ q_2 q_3 - 134{,}44\ q_1 q_2 (q_1-q_2) + 222{,}06\ q_1 q_3 (q_1-q_3) - 1{,}83\ q_2 q_3 (q_2-q_3) - 248{,}86\ q_1 q_2 q_3$

$Y_{II-1} = 2{,}28\ q_1 + 1{,}85\ q_2 + 0{,}73\ q_3 + 2{,}45\ q_1 q_2 - 0{,}23\ q_1 q_3 + 0{,}72\ q_2 q_3 - 0{,}24\ q_1 q_2 (q_1-q_2) + 1{,}60\ q_1 q_3 (q_1-q_3) + 0{,}72\ q_2 q_3 (q_2-q_3) - 1{,}83\ q_1 q_2 q_3$

$Y_{II-2} = 4{,}67\ q_1 + 3{,}12\ q_2 + 1{,}5\ q_3 + 3{,}075\ q_1 q_2 - 1{,}7\ q_1 q_3 + 1{,}675\ q_2 q_3 + 3{,}50\ q_1 q_2 (q_1-q_2) + 3{,}09\ q_1 q_3 (q_1-q_3) - 0{,}98\ q_2 q_3 (q_2-q_3) - 12{,}57\ q_1 q_2 q_3$

$Y_{II-3} = 770\ q_1 + 780\ q_2 + 1070\ q_3 - 200\ q_1 q_2 - 175\ q_1 q_3 - 200\ q_2 q_3 - 478{,}1\ q_1 q_2 (q_1-q_2) - 200{,}4\ q_1 q_3 (q_1-q_3) + 221{,}9\ q_2 q_3 (q_2-q_3) + 690{,}2\ q_1 q_2 q_3$

$Y_{II-4} = 44\ q_1 + 5{,}2\ q_2 + 6{,}7\ q_3 - 41{,}3\ q_1 q_2 - 13{,}8\ q_1 q_3 + 0{,}7\ q_2 q_3 - 30{,}5\ q_1 q_2 (q_1-q_2) + 6{,}3\ q_1 q_3 (q_1-q_3) + 0{,}4\ q_2 q_3 (q_2-q_3) - 8{,}3\ q_1 q_2 q_3$

$Y_{III-1} = 1{,}48\ q_1 + 1{,}24\ q_2 + 0{,}46\ q_3 + 6{,}75\ q_1 q_2 - 0{,}43\ q_1 q_3 + 0{,}2\ q_2 q_3 + 1{,}30\ q_1 q_2 (q_1-q_2) + 0{,}41\ q_1 q_3 (q_1-q_3) - 0{,}05\ q_2 q_3 (q_2-q_3) + 13{,}10\ q_1 q_2 q_3$

$Y_{III-2} = 5{,}12\ q_1 + 5{,}27\ q_2 + 1{,}98\ q_3 + 4{,}55\ q_1 q_2 - 2{,}18\ q_1 q_3 - 3{,}25\ q_2 q_3 + 5{,}57\ q_1 q_2 (q_1-q_2) + 1{,}49\ q_1 q_3 (q_1-q_3) - 3{,}25\ q_2 q_3 (q_2-q_3) + 21{,}98\ q_1 q_2 q_3$

$Y_{III-3} = 850\ q_1 + 960\ q_2 + 1345\ q_3 + 200\ q_1 q_2 - 37{,}5\ q_1 q_3 - 62{,}5\ q_2 q_3 - 339{,}9\ q_1 q_2 (q_1-q_2) - 439{,}6\ q_1 q_3 (q_1-q_3) + 291{,}7\ q_2 q_3 (q_2-q_3) + 735{,}3\ q_1 q_2 q_3$

$Y_{III-4} = 84{,}3\ q_1 + 10{,}8\ q_2 + 14{,}3\ q_3 - 132{,}25\ q_1 q_2 - 24\ q_1 q_3 - 6{,}5\ q_2 q_3 - 86{,}5\ q_1 q_2 (q_1-q_2) + 71{,}0\ q_1 q_3 (q_1-q_3) - 0{,}75\ q_2 q_3 (q_2-q_3) - 64{,}4\ q_1 q_2 q_3$

Адекватність отриманих рівнянь перевіряли за допомогою *t*-критерію Стьюдента, використовуючи 5 контрольних точок (11-15) плану експерименту. При кількості дослідів N=15, числі паралельних дослідів n=3 і рівні значимості p=0,05 табличне значення критерію Стьюдента $t_т$=2,13. Для всіх контрольних точок *t*-співвідношення менше табличного, тобто отримані моделі є адекватними.

З метою вивчення впливу складу полімерної композиції на властивості плівок виконано відповідні розрахунки значень вихідних змінних та побудовано криві рівних значень усіх досліджуваних показників Y_1 - Y_4 полімерних плівок на площині правильного симплекса в системі координат псевдокомпонентів (рис. 1, 2). Наведені криві рівних значень показників дають змогу проаналізувати характер індивідуального чи сумісного впливу компонентів полімерної композиції на її властивості.

Як видно з рис. 1, усі компоненти композиції впливають на окремі показники плівок по-різному. Так, міцність полімерних плівок з поліакрилату МБМ-3 залежить, головним чином, від вмісту і твердості полімеру (фактор q_3); і значно слабше – від вмісту препаратів ЕПАА і ОСХ (фактор q_1), про що свідчить характер ізоліній вихідних змінних Y_{I-1} і Y_{I-2}. Особливо ця закономірність характерна для ділянки симплекса з малою концентрацією препаратів. Така ж закономірність спостерігається й для плівок з поліуретану СЗПУ-7 АТЗ, особливо для показника Y_2, тобто для межі міцності при розтягуванні.

Слід зазначити, що характер зміни показників міцності Y_1 та Y_2 для модифікованих полімерних композицій майже ідентичний, тобто і на модуль еластичності при 100 %-му видовженні, і на межу міцності при розтягуванні плівок вплив препаратів ЕПАА і ОСХ схожий. Незначна відмінність проявляється в характері зміни ізоліній показника тягучості плівок Y_3, на який впливають окрім твердості полімеру також вміст препаратів ЕПАА і ОСХ. На еластичність і міцність плівок, отриманих з композиції МБМ-3 : СЗПУ-7 АТЗ, препарати ЕПАА і ОСХ спричинюють значно сильніший вплив, ніж на індивідуальні полімерні матеріали, що можна пояснити можливими міжфакторними взаємодіями в системі, тобто можливим утворенням зв'язків між полімером і модифікаторами.

Окремо слід розглянути вплив компонентів композицій на показник набухання плівок Y_4 (рис. 1, 2). Так, на стійкість плівок до дії води найбільший вплив спричиняє продукт ЕПАА, дещо менший – ОСХ і значно слабше впливає вміст полімеру, особливо для поліуретанових плівок, а також в області низьких концентрацій модифікаторів.

Характерною особливістю цих залежностей є те, що, на відміну від попередніх вихідних змінних Y_1-Y_3, на площині симплекса показника Y_4 спостерігається область мінімальних значень набухання плівок з поліакрилату і полімерної композиції МБМ-3 : СЗПУ-7 АТЗ. Ця область обмежується значеннями показника набухання, меншими за набухання вільних не модифікованих плівок (25,1 % для поліакрилату і 14,3 % – для поліакрилоуретану). Вище цієї межі спостерігається плавна послідовна зміна показника набухання в

залежності від вмісту гідрофільного препарату ЕПАА і структуруючого агента ОСХ, що свідчить про взаємнокомпенсуючу дію модифікаторів на полімер. Тобто, максимальне значення набухання плівок спостерігається при максимальному вмісті в системі екзополіакриламіду і повній відсутності в ній основного сульфату хрому.

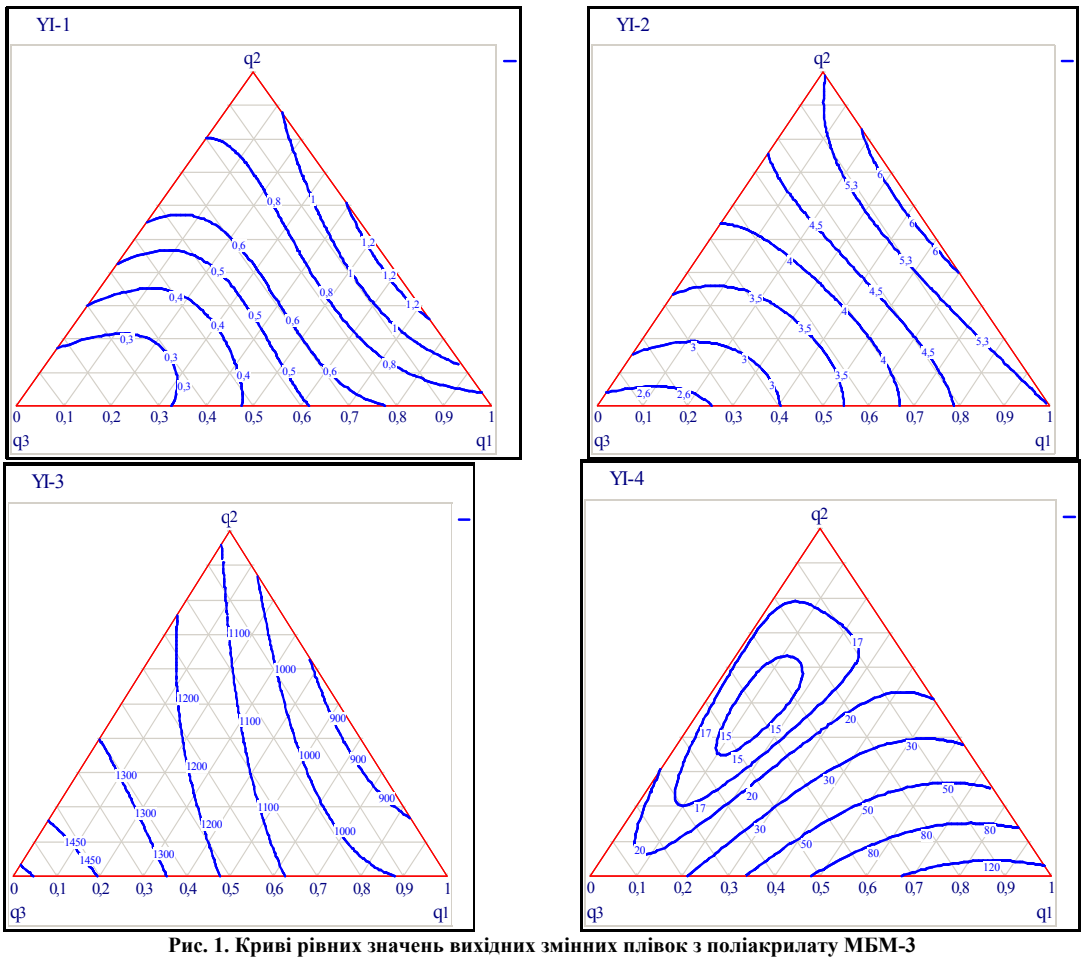


Рис. 1. Криві рівних значень вихідних змінних плівок з поліакрилату МБМ-3

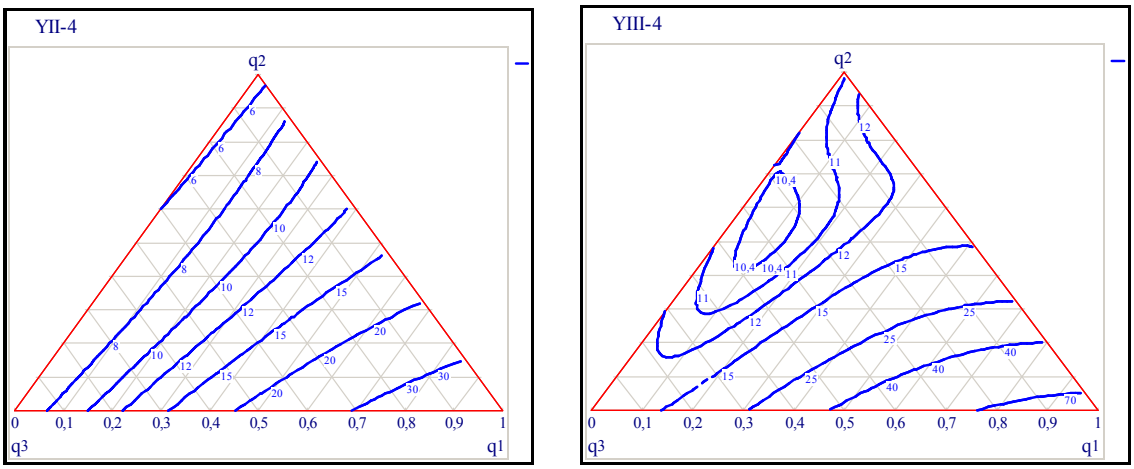


Рис. 2. Криві рівних значень набухання плівок з поліуретану СЗПУ-7 АТЗ та композиції МБМ-3 : СЗПУ-7 АТЗ

Однак, в області мінімальних значень показника набухання характер кривих змінюється. Мінімальні значення набухання досягаються не при нульовому вмісті ЕПАА (що було б цілком логічно), а при його концентрації 1,2 % для акрилового та 0,8 % – для композиційного полімеру; на відміну від поліуретанових плівок, мінімальне набухання котрих проявляється при нульовому вмісті ЕПАА. Вміст ОСХ при цьому становить 2,35 і 2,65 %, відповідно, для поліакрилату МБМ-3 і композиції МБМ-3 : СЗПУ-7 АТЗ. Поява мінімальних значень показника набухання свідчить про вірогідний прояв взаємодії в системі, а саме блокування частини гідрофільних груп екзополіакриламіду структуруючим агентом ОСХ і полімером.

Для плівок поліуретану СЗПУ-7 АТЗ, що характеризуються більш компактною структурою і містять численні хімічні й фізико-хімічні зв'язки в полімерному ланцюгу, а також вирізняються мінімальним серед досліджуваних полімерів набуханням, значно нижчим за набухання поліакрилату МБМ-

3, під впливом ОСХ спостерігається поступове зниження показника набухання і його мінімальне значення досягається при значно більшому (4,95 %) вмісті ОСХ. При цьому отримуються плівки з мінімальним набуханням, значно меншим за набухання акрилових і композиційних плівок, – усього 5,23 %. Однак, як зазначалось, при такому високому вмісті ОСХ помітно погіршуються фізико-механічні властивості плівок, що не відповідає технологічним вимогам до покривних плівок.

Для практичного використання результатів аналізу регресійних моделей виконують перехід від псевдокоординат до натуральних змінних за допомогою формул переведення координат із однієї афінної системи в іншу [10]. Використовуючи розраховані формули зв'язку між координатами q_i і x_i:

$$x_1 = 0{,}1\ q_1;\quad x_2 = 0{,}05\ q_2;\quad x_3 = 1 - 0{,}1\ q_1 - 0{,}05\ q_2 = 1 - x_1 - x_2;$$

можна визначити оптимальні співвідношення компонентів покривних композицій в початкових (натуральних) координатах та оптимальні значення кожної вихідної змінної Y*опт* (табл. 2).

Таблиця 2

Оптимальні та компромісні співвідношення компонентів

Функція відгуку	Псевдокомпоненти			Компоненти			Y*опт*	Y*комп*
	q_1	q_2	q_3	x_1	x_2	x_3		
Y_{I-1}	0,58	0,42	0,0	5,6	2,2	92,2	1,27	0,96…1,11
Y_{I-2}	0,36	0,64	0,0	6,8	1,6	91,6	6,27	5,37…5,74
Y_{I-3}	0,0	0	1	0	0	100	1650	977…918
Y_{I-4}	0,12	0,47	0,41	1,2	2,35	96,45	14,64	21,2…21,4
Компромісний варіант	0,40...0,47	0,48...0,5	0,05…0,1	4,0...4,7	2,4...2,5	92,9...93,5	–	–
Y_{II-1}	0,56	0,44	0,0	5,6	2,2	92,2	2,69	2,25…2,30
Y_{II-2}	0,78	0,22	0,0	7,8	1,1	91,6	5,19	3,35…3,45
Y_{II-3}	0,0	0	1	0	0	100	1070	805…812
Y_{II-4}	0,0	0,99	0,01	0	4,95	95,05	5,23	9,30…9,47
Компромісний варіант	0,21...0,22	0,68...0,7	0,08…0,11	2,1...2,2	3,4...3,5	94,3...94,5	–	–
Y_{III-1}	0,56	0,44	0,0	5,6	2,2	92,2	3,08	2,84…2,89
Y_{III-2}	0,68	0,32	0,0	6,8	1,6	91,6	6,59	5,83…5,95
Y_{III-3}	0,0	0	1	0	0	100	1345	998…1012
Y_{III-4}	0,08	0,53	0,39	0,8	2,65	94,55	10,22	13,6…14,5
Компромісний варіант	0,4...0,41	0,47...0,53	0,07…0,12	4,0...4,1	2,35...2,65	93,25...93,55	–	–

Дані табл. 2 підтверджують наведені вище закономірності індивідуального впливу кожного компонента полімерної композиції на властивості полімерних плівок. І оптимальні значення кожної вихідної змінної досягаються при різних співвідношеннях компонентів системи, що значно ускладнює отримання кінцевого оптимального результату, який би відповідав вимогам до кожної вихідної змінної.

Якщо певний процес описують декількома рівняннями регресії і важливими є результати кількох вихідних змінних, то у цьому випадку слід вирішувати компромісну задачу – визначати екстремальне значення однієї вихідної змінної за умови обмежень, що накладаються на інші та на границі областей дослідження [13]. Оптимум параметрів, що досягається при виконанні таких умов, як правило, називають умовним або відносним, а область параметрів процесу, в межах якої отримують вихідні змінні, що задовольняють усім зазначеним вимогам, – раціональною чи компромісною областю [13].

Задачу оптимізації процесів, що характеризуються декількома відгуками, як правило, зводять до оптимізації за одним критерієм з обмеженнями у вигляді рівнянь та нерівностей. Одним з найбільш вдалих способів вирішення задачі оптимізації з великою кількістю відгуків є використання у якості узагальненого критерію оптимізації так званого критерію Харингтона або узагальненої функції бажаності D [10].

Для побудови узагальненої функції бажаності D перетворюють виміряні значення відгуків у безрозмірну шкалу бажаності d за допомогою методу кількісних оцінок з інтервалом значень бажаності від нуля до одиниці. Значення d=0 (або D=0) відповідає абсолютно неприйнятному значенню даного відгуку; 0,63...0,79 – хорошому; 0,80...0,99 – дуже хорошому значенню; а d=1 (або D=1) – найкращому значенню відгуку, причому подальше його покращання або неможливе, або не має рації [10].

Для ефективного проведення процесу оздоблення та надання покриттю на шкірі необхідних експлуатаційних показників покривна плівка має задовольняти ряду технологічних вимог, зокрема характеризуватись відповідними показниками фізико-механічних і фізико-хімічних властивостей, що визначаються залежно від виду оздоблення та асортименту готових шкір [2]. Відповідно до цих вимог, визначено наступні обмеження вихідних змінних для пошуку оптимального (раціонального) складу модифікованих полімерних композицій (табл. 3).

Таблиця 3

Обмеження вихідних змінних

Функція відгуку	Плівкоутворювач		
	МБМ-3	СЗПУ-7 АТЗ	МБМ-3 : СЗПУ-7 АТЗ
Y_1, МПа	0,9 - 1,3	2,0 – 2,5	2,5 – 3,1
Y_2, МПа	4,0 - 6,3	3,0 - 5,19	5,0 - 6,0
Y_3, %	900,0 – 1100,0	800,0 – 900,0	950,0 – 1050,0
Y_4, %	20,0 – 25,0	9,0 – 12,0	15,0 – 20,0

Шляхом регресійного аналізу моделей вихідних змінних отримано компромісні (раціональні) співвідношення компонентів покривних композицій та компромісні функції відгуку *Yкомп* для всіх трьох полімерних композицій, що забезпечують необхідні технологічні властивості модифікованим полімерним плівкам (табл. 2, рис. 3). При цьому, значення узагальненої функції бажаності *D* для даних варіантів оптимізації (з рухом до оптимального показника Y_4) становить більше 0,7 для композицій I, II та більше 0,8 – для композиції III, що є , відповідно, хорошим і дуже хорошим значеннями.

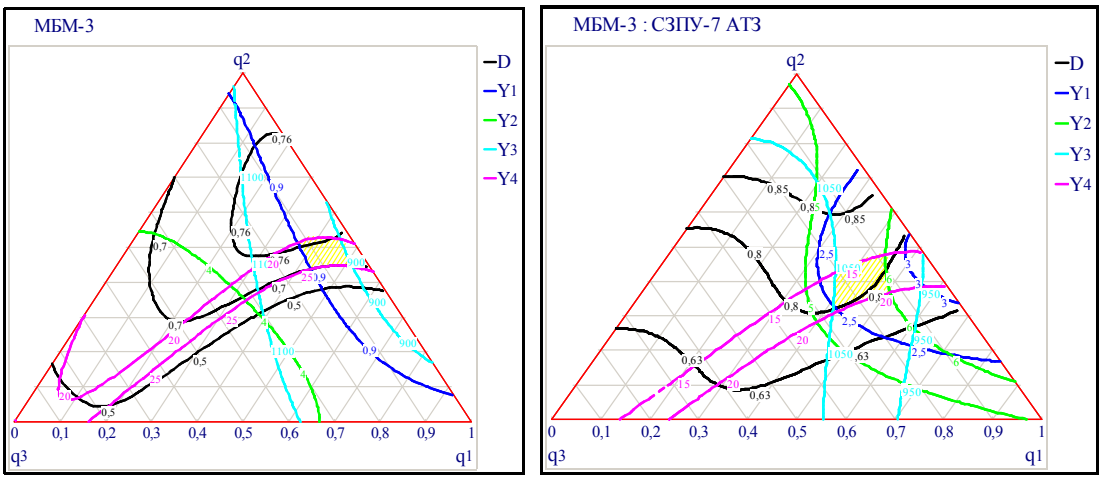


Рис. 3. Компромісні області складів полімерних композицій та показників покривних плівок

Слід зазначити, що раціональні співвідношення компонентів у складі модифікованих полімерних композицій, визначені компромісними областями, забезпечують отримання полімерних плівок з високими фізико-механічними показниками і водостійкістю, які можуть бути використані для компонування складів покривних фарб різних видів оздоблення в залежності від асортименту готових шкір.

Так, модифіковану поліакрилову композицію на базі МБМ-3 слід використовувати для формування більш м'яких і тягучих нижніх шарів покриття, а більш твердий і з меншим видовженням полімер на базі СЗПУ-7 АТЗ – у верхніх його шарах. Модифікована уретанова композиція СЗПУ-7 АТЗ з високими показниками міцності, видовження і водостійкості може бути використана для анілінового оздоблення, а сумішева МБМ-3 : СЗПУ-7 АТЗ з додаванням пігментних матеріалів – для компактного емульсійного оздоблення. Також, шляхом зміни співвідношення компонентів модифікованих полімерних композицій забезпечується регулювання властивостей покривних плівок в залежності від призначення готової продукції.

Висновки

1. За допомогою D-оптимальних симплексно-решіткових планів експерименту досліджено індивідуальний і комплексний вплив компонентів модифікованих акрилових і уретанових полімерних композицій на фізико-механічні властивості та водостійкість покривних плівок. Визначено закономірності зміни показників полімерних плівок у присутності екзополіакриламіду та струкутуруючого агента основного сульфату хрому та показано можливість регулювання властивостей покривних плівок в залежності від призначення готової продукції.

2. Шляхом регресійного аналізу моделей вихідних змінних отримано раціональні співвідношення компонентів полімерних композицій, за яких забезпечуються необхідні показники технологічних властивостей модифікованих полімерних плівок. Показано, що такі раціональні співвідношення компонентів дають змогу сформувати полімерні плівки з високими фізико-механічними показниками та водостійкістю, які можуть бути використані для компонування складів покривних фарб різних видів оздоблення в залежності від асортименту готових шкір.

3. Для ефективного формування покриття на шкірі та надання йому необхідних показників якості рекомендується використовувати розроблені модифіковані акрилові полімерні композиції у складі нижніх шарів емульсійного оздоблення, поліуретанові – для анілінового оздоблення, а акрилоуретанові модифіковані композиції з додаванням пігментних матеріалів – для компактного емульсійного оздоблення.

Література

1. Касьян Е. Є. Анілінове оздоблення шкір дисперсіями забарвлених поліуретанів / Е. Є. Касьян, А. В. Сміла // Вісник КНУТД. – 2007. – № 1. – С. 57–64.

2. Інноваційні технології виробництва шкіряних і хутрових матеріалів та виробів : монографія / А.Г. Данилкович, І.М. Грищенко, Е.Є. Касьян та ін. ; за ред. А.Г. Данилковича. – К. : Фенікс, 2012. – 344 с.

3. Касьян Е. Є. Дослідження властивостей модифікованих полімерних плівкоутворювачів для оздоблення шкір / Е. Є. Касьян, О. В. Ковтуненко // Вісник КНУТД. – 2007. – № 4 (36). Спец. випуск. – С. 139–144.

4. Екологічно орієнтовані технології виробництва шкіряних та хутрових виробів для створення конкурентоспроможних товарів : монографія : в 2 ч. Ч. І / А.Г. Данилкович, В.І. Лішук, Е.Є. Касьян та ін. ; за ред. А.Г. Данилковича. – К. : Фенікс, 2011. – 438 с.

5. Кондратюк О.В. Властивості полімерних плівок, модифікованих похідними єкзополісахаридів / О.В. Кондратюк, Е.Є. Касьян // Вісник ХНУ. – 2016. – № 4. – С. 89–94.

6. Кондратюк О. В. Седиментаційні дослідження модифікованих полімерних композицій / О.В. Кондратюк, Е. Є. Касьян // Збірник тез ІІ Міжнародного науково-практичного семінару "Інноваційні матеріали та технології шкіряно-хутрового виробництва" (м. Київ, 19 листопада 2016 р.). – К. : КНУТД, 2016. – С. 24–25.

7. Пат. 24856 Україна, МКИ4 А С08F220/56. Спосіб одержання співполімеру поліакриламіду (ЕПАА) / Є.М. Видющенко, С.К. Воцелко, Р.І. Гвоздяк, В.П. Гнідець, О.О. Литвинчук, Г.С. Сарібеков, В.А. Болоховська. – Опубл.15.10.02, Бюл. № 10.

8. Кондратюк О. В. Фізико-механічні властивості модифікованих полімерних матеріалів / О.В. Кондратюк, Е. Є. Касьян // Матеріали ІІ Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції "Сучасне матеріалознавство та товарознавство: теорія, практика, освіта" (м. Полтава, 22-23 березня 2016 р.). – Полтава : ПУЕТ, 2016. – С. 191–194.

9. Данилкович А. Г. Практикум з хімії і технології шкіри та хутра / Данилкович А. Г. – К. : КДУТД, 1999. – 428 с.

10. Ахназарова С. Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. – М. : Высшая школа, 1985. – 327 с.

11. Зедгинидзе И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / Зедгинидзе И. Г. – М. : Наука, 1976. – 390 с.

12. Халафян А. А. Statistica 6. Статистический анализ данных / Халафян А. А. – М. : Бином, 2007. – 512 с.

13. Евтушенко Ю. Г. Методы решения экстремальных задач и их применение в системах оптимизации / Евтушенко Ю. Г. – М. : Наука, 1982. – 432 с.

References

1. Kasian E. Ye. Anilinove ozdoblennia shkir dyspersiiamy zabarvlenykh poliuretaniv / E. Ye. Kasian, A. V. Smila // Visnyk KNUTD. 2007. 1. S. 5764.

2. Innovatsiini tekhnolohii vyrobnytstva shkirianykh i khutrovykh materialiv ta vyrobiv : monohrafiia / A.H. Danylkovych, I.M. Hryshchenko, E.Ye. Kasian ta in. ; za red. A.H. Danylkovycha. – K. : Feniks, 2012. – 344 s.

3. Kasian E. Ye. Doslidzhennia vlastyvostei modyfikovanykh polimernykh plivkoutvoriuvachiv dlia ozdoblennia shkir / E. Ye. Kasian, O. V. Kovtunenko // Visnyk KNUTD. 2007. 4 (36). Spets. vypusk. S. 139144.

4. Ekolohichno oriientovani tekhnolohii vyrobnytstva shkirianykh ta khutrovykh vyrobiv dlia stvorennia konkurentospromozhnykh tovariv : monohrafiia : v 2 ch. Ch. I / A.H. Danylkovych, V.I. Lishuk, E.Ye. Kasian ta in. ; za red. A.H. Danylkovycha. – K. : Feniks, 2011. – 438 s.

5. Kondratiuk O.V. Vlastyvosti polimernykh plivok, modyfikovanykh pokhidnymy yekzopolisakharydiv / O.V. Kondratiuk, E.Ye. Kasian // Visnyk KhNU. – 2016. – 4. – S. 89–94.

6. Kondratiuk O. V. Sedymentatsiini doslidzhennia modyfikovanykh polimernykh kompozytsii / O.V. Kondratiuk, E. Ye. Kasian // Zbirnyk tez II Mizhnarodnoho naukovo-praktychnoho seminaru "Innovatsiini materialy ta tekhnolohii shkiriano-khutrovoho vyrobnytstva" (m. Kyiv, 19 lystopada 2016 r.). – K. : KNUTD, 2016. S. 24–25.

7. Pat. 24856 Ukraina, MKY4 A S08F220/56. Sposib oderzhannia spivpolimeru poliakrylamidu (EPAA) / Ye.M. Vydiushchenko, S.K. Votselko, R.I. Hvozdiak, V.P. Hnidets, O.O. Lytvynchuk, H.S. Saribekov, V.A. Bolokhovska. – Opubl.15.10.02, Biul. 10.

8. Kondratiuk O. V. Fizyko-mekhanichni vlastyvosti modyfikovanykh polimernykh materialiv / O.V. Kondratiuk, E. Ye. Kasian // Materialy II Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii "Suchasne materialoznavstvo ta tovaroznavstvo: teoriia, praktyka, osvita" (m. Poltava, 22-23 bereznia 2016 r.). – Poltava : PUET, 2016. – S. 191–194.

9. Danylkovych A. H. Praktykum z khimii i tekhnolohii shkiry ta khutra / Danylkovych A. H. – K. : KDUTD, 1999. – 428 s.

10. Akhnazarova S. L. Metody optimizatsii eksperimenta v khimicheskoy tekhnologii / S. L. Akhnazarova. V. V. Kafarov. M. : Vysshaya shkola. 1985. 327 s.

11. Zedginidze I. G. Planirovaniye eksperimenta dlya issledovaniya mnogokomponentnykh sistem / Zedginidze I. G. – M. : Nauka. 1976. – 390 s.

12. Khalafyan A. A. Statistica 6. Statisticheskiy analiz dannykh / Khalafyan A. A. M. : Binom. 2007. 512 s.

13. Evtushenko Yu. G. Metody resheniya ekstremalnykh zadach i ikh primeneniye v sistemakh optimizatsii / Evtushenko Yu. G. – M. : Nauka. 1982. – 432 s.

Рецензія/Peer review : 04.11.2017 р. Надрукована/Printed :10.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Данилкович А.Г.

УДК 677.11.021

Г.А. БОЙКО, А.В. КУТАСОВ
Херсонський національний технічний університет

ВИЗНАЧЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОНОПЛЯНОГО КОТОНІНУ ТА ЗМІНА ЇХ ПІД ДІЄЮ ПРОПАРЮВАННЯ

В статті проведено дослідження фізико-механічних властивостей конопляного котоніну механічної обробки, з якого в Україні виробляють текстильні вироби. Визначено показник питомої подовження конопляного котоніну, який негативно впливає на формостійкість кінцевих виробів. З метою зниження цього показника проведено пропарювання невеликої кількості отриманого конопляного котоніну за певних режимів. Після чого показник питомого подовження зменшився в два рази, що дозволить підвищити формостійкість текстильних виробів. Результати теоретичних досліджень покладені в основу дослідження доцільності переробки на вітчизняних підприємствах волокнистої частини стебел технічної коноплі для товарів широкого вжитку.

Ключові слова: конопля, волокно, котонін, фізико-механічні властивості, пропарювання.

G.A. BOYKO, A.V. KYTASOV
Kherson National Technical University

DETERMINATION OF THE PROPERTIES OF THE CONTOUR COTONIN AND THEIR CHANGE UNDER THE EFFECT OF PROHIBITION

In this paper, the computerized fiber of technical hemp, a mechanical method for modifying fibers after steaming, is studied for the purpose of changing the exponential elongation index, which adversely affects the uniformity of future products.

The physical and mechanical properties of hemp kotonin mechanical processing from which textile products are manufactured in Ukraine are investigated. It is determined that the index of specific lengthening of hemp kotonin negatively affects the shape stability of finished products. In order to reduce this figure, steaming a small amount of hemp kotonin obtained in certain modes has been carried out. After that the index of specific lengthening decreased by half, which will increase the shape resistance of textile products.

The results of theoretical research are the basis of the study of the expediency of processing on the domestic enterprises of the fibrous part of technical hemp stems for consumer goods.

Keywords: hemp, fiber, kotonin, physical-mechanical properties, steaming.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Вирощування технічних конопель в Україні, в більшості випадків направлено на експорт насіннєвого матеріалу. У нашій державі, при значній нестачі вітчизняної сировини для текстильної галузі, така цінна сировина, як стебла конопель практично не використовується [1]. І навіть гірше того, вона спалюється, що замість доходів спричиняє великі проблеми для фермерських господарств. Солома конопель майже не використовується, а з 36 заводів з переробки конопель в Україні залишилося тільки три, і ті працюють за традиційною технологією на застарілому обладнанні. В результаті цього процесу той продукт, який вітчизняні підприємства з переробки коноплеволокна можуть запропонувати сучасному споживачеві, не відповідає більшості вимогам європейського ринку. Сировина після цієї обробки придатна тільки для виготовлення кручених виробів.

Відомо, що конопля містить міцні і довгі волокна [2]. Використання в пряжі такого волокна без модифікації не надає текстильним виробам м'якості бавовняного волокна. Для отримання якісної сировини для конкурентоспроможного асортименту текстильних товарів потрібно детально дослідити основні характеристики конопляного котоніну та визначити його прядильну здатність.

Аналіз останніх досліджень, у яких започатковано вирішення проблеми. Останні дослідження кон'юнктури світового ринку і попиту показують, що на даний час і в найближчому майбутньому лідируюче положення залишається за товарами з натуральної сировини [3]. Пояснюється це тим, що еко-товари з натуральних волокон, а особливо конопель відрізняються своїми гігієнічними, медико-біологічними та захисними властивостями. Також текстильні вироби з конопель вже не мають грубої текстури, вони завдяки новітнім технологіям, за своїми властивостями наближаються до виробів з бавовняного волокна. Світовими лідерами з переробки коноплеволокна: Франція, Канада, Німеччина, Китай, – покращуються технології котонізації, що призводить до зміни основних властивостей волокна.

На даний час, конопляний котонін механічного способу модифікації волокон, у виробництві текстильних товарів широко використовується по всьому світі. Світові лідери з виробництва текстильних товарів пропонують сучасному споживачу широкий асортимент якісної продукції з конопляного котоніну. Конопляний котонін в Україні почав використовуватися нещодавно. Вітчизняні науковці тільки почали знайомство з його особливими властивостями, які за своїми фізико-механічними, гігієнічними та анатомічними характеристиками відрізняються від короткого волокна конопель [4, 5]. Тому, дослідження якісних властивостей конопляного котоніну, з метою подальшого застосування у виробництві пряжі та текстильних виробів, є основним завданням фахівців з переробки даної сировини.

Формулювання цілей статті. Зміна показника розривного подовження конопляного котоніну технічних конопель під дією пропарювання, з метою підвищення формостійкості майбутніх виробів з даної сировини.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових

результатів. Коноплі – це необмежені текстильні можливості. Конопляне волокно відрізняється від інших волокон своєю міцністю, стійкістю проти гниття, санітарно-гігієнічними властивостями, довговічністю, опором ультрафіолету тощо. Використання коноплеволокна тільки в кручених виробах не розкриває увесь потенціал сировини, який може бути направлений на виробництво вишуканих модних виробів. Але використання в пряжі такого волокна без модифікації не можливе для виготовлення м'яких та вишуканих текстильних виробів. Провідні виробники текстилю з коноплеволокна вже давно вирішили цю проблему і широко практикують з конопляним котоніном [6].

Задача сучасних технологій котонізації конопляного волокна – це одержання котоніну з незначним ступенем засміченості, лінійна щільність якого близька до лінійної щільності волокна, призначеного для змішування або для отримання пряжі. Відомі способи котонізації: механічний, хімічний, біологічний, фізико-механічний.

Механічний спосіб модифікації волокон найбільш розповсюджений. В порівнянні з іншими він технологічно простий і екологічно чистий. Обладнання для модифікації луб'яного волокна пропонується відомими провідними підприємствами (Ларош – Франція, Темафа – Німеччина, Шарле, ВанДом – Бельгія, Юньань Индастри Хемп – Китай) та використовується на заводах з переробки луб'яних культур по всьому світі [7].

Даний спосіб включає в себе дроблення та укорочення грубих волокнистих комплексів механічним шляхом. Процес дроблення полягає в порушенні механічних зв'язків між елементарними волокнами і лігніном, які зв'язані в щільний компактний пучок технічних волокон. Це здійснюється шляхом застосування ззовні дуже жорстких механічних впливів з боку робочих органів обладнання. Робочі органи обладнання можуть мати різну конструкцію: м'яльні вальці, била з різною формою бильних планок, голчасті тіпальні механізми, пилчасті і інші стрічки. У зв'язку з цим, незважаючи на відмінність механічних впливів на волокно з боку робочих органів обладнання, всі вони обробляють волокно трьома способами: вигин-злам, розтягування, поперечний стиск, які не тільки обробляють волокно, а й зменшують його довжину.

Тому, дана робота проводилася саме з конопляним котоніном механічного способу модифікації волокон [8]. Всі дослідження здійснювалися на базі науково-дослідної лабораторії переробки натуральних волокон кафедри товарознавства, стандартизації та сертифікації та лабораторії матеріалознавства кафедри механічної технології волокнистих матеріалів Херсонського національного технічного університету.

Модифіковане конопляне волокно, не можливо оцінювати згідно з ГОСТ 9993-74 «Пенька короткая» та ГОСТ 10379-76 «Пенька трепанная» у зв'язку з тим, що в результаті застосування технології механічної обробки стебел технічних конопель одержують волокно з новими показниками якості. Характер механічних дій котонізації, а саме подрібнення стебел трести конопель, м'яття, трясіння, розпушування, очищення, чесання, відрізняється від традиційної технології переробки конопель, до того ж довжина коноплеволокна, отриманого за такою технологією, значно менша, ніж довжина короткого коноплеволокна. Тому якісну оцінку волокон, одержаних механічною технологією модифікації волокон, пропонуємо здійснювати за методикою оцінки якості котоніну з короткого лляного волокна та бавовни.

Критеріями придатності волокон для подальшої технологічної переробки на прядильному обладнанні є показники довжини, товщини і розривного навантаження, які в комплексі оцінюють прядильну здатність волокна. Тому, в результаті критичного аналізу існуючих нормативних документів рекомендовано конопляний котонін оцінювати за такими фізико-механічними параметрами: розривне навантаження, розривне подовження, лінійна щільність, довжина волокна. Ці показники дають можливість проводити класифікацію волокон за функціональним призначенням.

Довжину конопляного котоніну визначали методом проміру окремих волокон, який полягає у визначенні найбільшої відстані між кінцями волокна у розпрямленому стані. Так як, котонізоване конопляне волокно має значну нерівномірність за довжиною, то для оцінки її нерівномірності застосовували зведені характеристики груп волокон, які поділили на максимальну, середню та мінімальну довжини. Результати досліджень наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Основні групи довжин конопляного котоніну

Максимальна довжина 120-90 мм	Середня довжина 80-60 мм	Мінімальна довжина 50-10 мм
30%	55%	15%

Аналіз досліджень виявив, що конопляний котонін має середню довжину, рівну приблизно 70 мм, яка на багато більше штапельної довжини середньоволокнистої бавовни, що за даним показником не дозволяє використовувати даний котонін для вироблення пряжі за бавовняною системою прядіння. При цьому відсоток коротких волокон і пуху становить 15 %, волокон придатних до прядіння – 75 %, довжиною волокон понад 10 мм – близько 7%, що відповідає нормативним показникам для прядіння за технологією короткого льону.

Крім аналізу довжини проводилися ретельні дослідження міцності і лінійної щільності конопляного котоніну. Оскільки конопляний котонін має велике подовження то визначати його за ГОСТом 9993-74 «Пенька короткая» неможливо, тому розривне навантаження та подовження визначали за діючими

нормативними документами на бавовну ГОСТ Р. 53224-2008 «Волокно хлопковое. Технические условия». Результати випробувань наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Показники міцності та тонини конопляного котоніну

№ з/п	Показник	Значення показника
1	Розривне навантаження одного волокна, гс	42,0
2.	Абсолютне розривне подовження, мм	10,6
3.	Відносне розривне подовження, %	17,2
4.	Лінійна густина, текс	6,8

Відомо, що на обладнанні підприємств по переробці бавовни в кардній системі прядіння використовуються волокна лінійної щільності 0,16–0,33 текс з розмірами поперечного перерізу 15–19 мкм. Отримане волокно котоніну має лінійну щільність 6,8 текс, що в 20 разів перевищує нормативну тонину бавовни. Отже, отриманий за даною технологією котонізації конопляний котонін за показниками товщини не відповідає показникам середньоволокнистої бавовни і не може бути використаний для отримання тонкої і м'якої пряжі.

Аналізуючи міцність волокон конопляного котоніну, яка є одним з найважливіших показників його якості, з даних таблиці, можна зробити висновок, що розривне навантаження котоніну на 39,5 гс більше максимального значення розривного навантаження волокон середньоволокнистої бавовни. Отже, волокна конопляного котоніну за розривним навантаженням перевершують волокна бавовни на 95%. Також розривне подовження конопляного котоніну становить 17,2%, з таким показником 100 відсоткове використання цієї сировини в пряжі для формостійких виробів не рекомендується. Можливо, для зменшення цього показника підбирати суміші з іншими волокнами або використовувати різні обробки волокна конопляного котоніну.

З цією метою вченими було здійснено пропарювання сировини в лабораторному автоклаві. Пропарювання матеріалу робили при наступних режимах:

- тиск: нагріву, варіння 1,2-7,1 кгс/см^2; пропарювання 1,8-2,3 кгс/см^2; промивка 0 кгс/см^2;
- температура: нагріву, варіння 90-160 ^{0}С; пропарювання 140-121 ^{0}С; промивка 40 ^{0}С;
- тривалість операції: нагріву, варіння 30 хв; пропарювання 20 хв.; промивка 10 хв.

Після пропарювання проводилися повторні дослідження фізико-механічних показників волокна конопляного котоніну. Результати якісних показників волокна після пропарювання надані у таблиці 3.

Таблиця 3

Показники міцності та тонини конопляного котоніну після пропарювання

№ з/п	Показник	Значення показника
1	Розривне навантаження одного волокна, гс	34,01
2.	Абсолютне розривне подовження, мм	5,3
3.	Відносне розривне подовження, %	9,3
4.	Лінійна густина, текс	5,5

Проведені дослідження показали значне зменшення показника розривного подовження, практично в половину. Також ми бачимо і зменшення лінійної щільності, що також позитивно впливає на якість кінцевого текстильного продукту. Невелике зменшення розривного навантаження не несе великого впливу на якість отриманого волокна. З чого робимо висновки, що пропарювання конопляного котоніну несе позитивний вплив на фізико-механічні властивості волокна.

Висновки та перспективи подальших досліджень. На основі проведених досліджень встановлено, що за рахунок пропарювання конопляного котоніну механічного способу модифікації, при певних режимах, можливо зменшення питомого подовження, що покращує формостійкість майбутніх текстильних виробів при їх експлуатації. Виходячи з цього, можна зробити висновок, що використання в легкій промисловості України конопляного котоніну з якісними споживними властивостями може сприяти вирішенню проблем кризового стану вітчизняної економіки із забезпеченням сировинної бази текстильних підприємств для отримання широкого асортименту текстильних товарів.

Література

1. Мохер Ю.В. Актуальні проблеми відродження коноплярства в Україні / Ю.В. Мохер, В.Г. Баранник // Біологія, вирощування, збирання та первинна переробка льону і конопель : зб. наук. праць. – Глухів : Інститут луб'яних культур УААН, 2004. – Вип. 3. – С. 177–192.

2. Сенченко Г.И. Конопля / под ред. Г.И. Сенченко, М.А. Тимонина. – 2 изд., перераб. и доп. – М. : Колос, 1987. – 287 с.

3. Международная ассоциация конопли [Електронний ресурс]. – Режим доступу : mojo.calyx.net/~olsen/HEMP/IHA/.

4. Расторгуєва М.Й. Розробка технології отримання багатокомпонентної пряжі з використанням конопляного котоніну : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.19.03 "Технологія текстильних матеріалів" / М.Й. Расторгуєва. – Херсон, 2007. – 23 с.

5. Ляліна Н.П. Перспективні напрямки одержання екологічної продукції з технічних конопель / Н.П. Ляліна, О.Ф. Богданова, Н.І. Резвих : материалы международной XI конференции «Стратегии качества в промышленности и образовании». – Варна, 2013. – С. 29–32.

6. Григорян Г.С. Котонізація льняного волокна в умовах текстильних підприємств / Г.С. Григорян // Легка промисловість. – 1997. – № 1. – С. 9–10.

7. Международная ассоциация конопли [Електронний ресурс]. – Режим доступу : mojo.calyx.net/~olsen/HEMP/EIHA/.

8. Бойко Г.А. Перспективи використання конопляного волокна в змішаній пряжі / Г.А.Бойко, Г.А. Тіхосова, А.В. Кутасов // Всеукраїнська наук.-прак. конф. студ. і молодих учених «Реформування системи технічного регулювання відповідно до вимог законодавства ЄС та торгівлі України», 23–25 травня 2017 р. : тези доп. – ХНТУ, 2017. – С. 60–63.

References

1. Mokher Yu.V. Aktualni problemy vidrodzhennia konopliarstva v Ukraini / Yu.V. Mokher, V.H. Barannyk // Biolohiia, vyroshchuvannia, zbyrannia ta pervynna pererobka lonu i konopel : zb. nauk. prats. – Hlukhiv : Instytut lubianykh kultur UAAN, 2004. – Vyp. 3. – S. 177–192.

2. Senchenko H.Y. Konoplia / pod red. H.Y. Senchenko, M.A. Tymonyna. – 2 yzd., pererab. y dop. – M. : Kolos, 1987. – 287 s.

3. Mezhdunarodnaia assotsyatsyia konoply [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : mojo.calyx.net/~olsen/HEMP/IHA/.

4. Rastorhuieva M.Y. Rozrobka tekhnolohii otrymannia bahatokomponentnoi priazhi z vykorystanniam konoplianoho kotoninu : avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk : spets. 05.19.03 "Tekhnolohiia tekstylnykh materialiv" / M.Y. Rastorhuieva. – Kherson, 2007. – 23 s.

5. Lialina N.P. Perspektyvni napriamky oderzhannia ekolohichnoi produktsii z tekhnichnykh konopel / N.P. Lialina, O.F. Bohdanova, N.I. Rezvykh : materyaly mezhdunarodnoi XI konferentsyy «Stratehyy kachestva v promyshlennosty y obrazovanyy». – Varna, 2013. – S. 29–32.

6. Hryhorian H.S. Kotonizatsiia lnianoho volokna v umovakh tekstylnykh pidpryiemstv / H.S. Hryhorian // Lehka promyslovist. – 1997. – Issue 1. – S. 9–10.

7. Mezhdunarodnaia assotsyatsyia konoply [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : mojo.calyx.net/~olsen/HEMP/EIHA/.

8. Boiko H.A. Perspektyvy vykorystannia konoplianoho volokna v zmishanii priazhi / H.A.Boiko, H.A. Tikhosova, A.V. Kutasov // Vseukrainska nauk.-prak. konf. stud. i molodykh uchenykh «Reformuvannia systemy tekhnichnoho rehuliuvannia vidpovidno do vymoh zakonodavstva YeS ta torhivli Ukrainy», 23–25 travnia 2017 r. : tezy dop. – KhNTU, 2017. – S. 60–63.

Рецензія/Peer review : 06.11.2017 р. Надрукована/Printed :11.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Тіхосова Г.А.

УДК 632.382: 620.179.4

Є.О. ГОЛІНКА
Хмельницький національний університет

ПРОБЛЕМАТИКА НАНЕСЕННЯ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ НА РУЛОННІ ТЕКСТИЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

В сучасному стані промисловості питання надання тканинним матеріалам специфічних властивостей є вкрай актуальним. Розмаїття будь-яких сфер, де застосування спеціалізованих тканин є життєвою необхідністю, породжує попит на нові технології та матеріали, що наносяться на тканини. Необмежені за рецептурними складовими, полімерні суміші вимагають нових технологічних рішень в процесі нанесення покриттів. Актуальність поєднання різних за своєю структурою процесів зумовлена попитом на ринку тканинних виробів.

Ключові слова: полімерні покриття, пристрої для нанесення плівок, електростатичне осадження, нанесення захисних покриттів

I.O. GOLINKA
Khmelnytskyi National University

PROBLEMS OF PROTECTING COATINGS ON RULL TEXTAIL MATERIALS

In the current state of the industry, the issue of providing tissue materials with specific properties is extremely relevant. The diversity of all areas where the use of specialized tissues is a vital necessity generates the demand for new technologies and materials that are applied to fabrics. Unconventional formulations, polymer mixtures require new technological solutions in the process of applying coatings. Actuality of the combination of different in its structure of processes is due to demand in the market of fabric products.

Keywords: *polymer coatings, devices for applying films, electrostatic precipitations, application of protective coatings*

Вступ

В даний час важко назвати галузь промисловості, в якій не використовуються матеріали, що представляють собою комбінацію основи-підкладки (тканини, фольги, паперті та т. д.) з різноманітними покриттями (фарбою, лаком, клеєм та ін.). Асортимент цієї продукції, що використовується всіма галузями, обчислюється тисячами видів.

Велику групу складають матеріали з покриттям на текстильну (тканину та неткану) основу. Це бязь, тик, сатин, мішковина, парусина, нейлон, склотканина та інші підкладки з покриттями з вінілових, резинових, поліуретанових, поліефірних та інших складів, що використовуються як лінолеум, оздоблювальні матеріали, штучні шкіри, клеєні для виготовлення тентів , дощовиків, кораблів, вентиляційних систем, корпусів автомобілів та інше.

Широко використовуються матеріали, що випускаються на основі полімерних плівок, листів, еластичних пористих стрічок. Полімерні матеріали (пластмаси, композити, пластики) - це композиції певного складу, які отримують з мономерів, олігомерів, полімерів з введенням при їх виготовленні або в процесі формування виробу різних компонентів (інгредієнтів) для цілеспрямованого отримання властивостей як матеріалу, так і виробу з нього. До цієї групи відносятся: клейові плівки, призначені для збірки деяких конструкцій у будівництві, автомобільному та суднобудуванні; плівки та ленти з нанесеним липким шаром для упаковки товарів, обробки приміщень, герметизації будівельних конструкцій, кріплення афіш, побутового призначення; фотоплівки різноманітного призначення; плівки для зберігання та транспортування продуктів харчування; плівки з особливими видами покриттів, що застосовуються в електротехнічній, радіоелектронній та інших галузях промисловості.

Загальні риси нанесення полімерних покриттів

У полімерний матеріал можуть входити одночасно або в різному поєднанні: сполучна (полімерна матриця), наповнювачі, пластифікатори, стабілізатори, барвники, зшиваючі агенти (отверджувачі), структуроутворювачі, пороутворювачі, мастила, антипірени, антистатики, антимікробні агенти і інші компоненти, які надають специфічні властивості композиції в цілому.

Покриття, що наносяться можуть бути односторонніми або двосторонніми, з одного і того ж або з різних складів, однакової і різної товщини. У ряді випадків використовують багатошарові покриття.

З точки зору характеру розподілу покриття на підкладці можна виділити чотири основні види покриттів (рис. 1):

- згладжувальні - призначені для згладжування мікрорельєфу підкладки. Іноді покриваючий склад може покривати виступи, утворюючи тонкий шар. Особливісттю такого покриття є нерівномірність товщини, що відображає нерівномірність мікрорельєфу підкладки. Покриття цього виду застосовують при мелуванні паперу, грунтовки текстильних підкладок, листів. До товщини покриття і товщини матеріалу в цілому не пред'являють жорстких вимог. Головною метою процесу є отримання гладкої поверхні підкладки;
- вирівнюючі - призначені для виравнювання не тільки мікрорельєфу, а й профілю підкладки, щоб отримати рівномірне по товщині виробу в цілому або площинність однієї з його сторін. Такий характер розподілу можна спостерігати при виробництві штучної шкіри, декоративних листових матеріалів і

дерев'яних плит;

- просочуючі - призначені для просочення підкладки з утворенням або без утворення суцільного поверхневого шару. Проникаючі вглиб підкладки склади використовують для модифікації її властивостей (надання міцності, водо- чи вогнестійкості та інше.);
- рівнотовщинні - призначені для будь-яких технічних функцій, що залежать від товщини покриття, або для остаточної обробки виробів з декоративною метою [1].

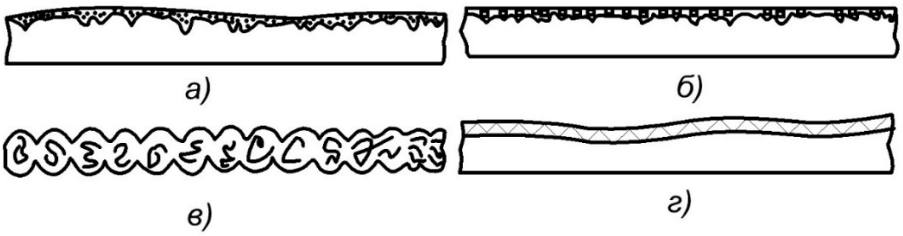


Рис. 1. Види розподілу покриття на підкладці: а) згладжувальний; б) вирівнюючий; в) просочуючий; г) рівнотовщинний

Різноманіття вживаних підкладок з огляду на матеріал, розміри, форму і механічні властивості, а також вимог, що пред'являються до покриттів і їх властивостей, зумовило різноманітність використовуваного обладнання як за складом, так і за конструктивним виконанням.

Найбільш прості машини містять завантажувальний, наносний і приймальний пристрої; сушка покриттів проводиться в окремих камерах. Такі машини застосовують для покриття деяких штучних підкладок (деталей взуття, одягу, плит і таке інше). У більш досконалому обладнанні, особливо для нанесення покриттів на рулонні підкладки, сушильний пристрій розташовують між наносним і прийомним (відділ намотування). При необхідності дублювання покритої підкладки з іншими рулонними матеріалами між сушильним пристроєм і намотуванням встановлюють розмотування для з'єднується матеріалу і ламинатор для з'єднання останнього з покритою підкладкою. Роботу всіх машин і пристроїв підпорядковують необхідній технологічній послідовності, синхронізують швидкості машин, в результаті чого утворюється єдина технологічна лінія з централізованим пунктом контролю і управління.

Перед нанесенням покриття в ряді випадків готують підкладку: знепилюють, деаерують, промивають, розгладжують, активізують поверхню та ін.

Лінії оснащують пристроями для орієнтації підкладки, зняття статичної електрики; приладами для виміру товщини покриття, що наноситься; пристроями для склеювання підкладки виробленого і нового рулонів; магазинами запасу, що забезпечують безперервність процесу в момент перезарядки і склейки підкладки; механізмом стабілізації її натягу та ін.

Способи нанесення полімерних плівок з огляду на технологію

Істотний вплив на склад обладнання надає спосіб нанесення покриття і спосіб виробництва продуктів в цілому.

У сучасному обладнанні використовують в основному спосіб прямого нанесення покриттів, проте в деяких випадках застосовують непрямий спосіб. При прямому способі покриття наносять безпосередньо на оброблювану підкладку. [2]

Сутність непрямого методу полягає в тому, що покриття наносять на тимчасову підкладку, а потім перекладають зафіксований шар на оброблювану підкладку. В якості тимчасової підкладки використовують поверхні металевих барабанів, металеві стрічки, рулонні підкладки з попередньо нанесеним антиадгезійним (наприклад, кремнійорганічним) складом. Непрямий спосіб застосовують для отримання одно-товщинних шарів, якщо нерівнотовщинність підкладки не дозволяє отримати їх прямим нанесенням; в тих випадках, коли необхідно зменшити адгезію покриття з підкладкою з метою подальшого поділу їх; для отримання багатошарових покриттів з чіткими кордонами між шарами, а також в тих випадках, коли режими сушки покриття неприйнятні для основної підкладки.

Для виробництва багатьох видів продукції використовують багатошарові і двосторонні покриття підкладок. При цьому організація технологічного процесу і відповідна їй конструкція обладнання можуть бути виконані в трьох варіантах.

Найбільш простим є обладнання, в якому процес отримання кожного шару здійснюється окремо, з неодноразовим проходом виробу (послідовний метод). Однак при такій технології процесу відзначається зайва витрата енергії на сушку покриття та зниження продуктивності, пропорційне числу шарів.

Багатошарові або двосторонні покриття намагаються наносити в одній лінії і отримувати на виході готовий виріб (паралельно-послідовний метод). З цією метою в лінії встановлюють кілька наносних пристроїв і кожний наступний шар наносять після повного або часткового просушування попереднього шару (мокрий по сухому). У порівнянні з послідовним цей метод дозволяє підвищити продуктивність в стільки разів, скільки наноситься шарів, без урахування часу, необхідного на проходження підкладки від першого до останнього наносного пристрою. Лінії, в яких використовується цей метод, відрізняються громіздкістю. Крім того, попередні шари піддаються кількаразовому впливу температурних навантажень,

що застосовуються для сушіння наступних шарів.

Повторне проходження матеріалу в наносному пристрої може призвести до деформації попереднього шару. При нанесенні тонких багатошарових покриттів погіршуються умови досягнення необхідної равнотовщинності шарів. Це в ряді випадків призводить до погіршення якості покриття і продукції в цілому.

Очевидно, найбільш ефективним є паралельний метод, при якому всі шари наносять в одному місці, декількома або, що ще краще, одним наносним пристроєм. Здійснення паралельного способу часто вимагає спеціальних конструкцій нанесених пристроїв, розробка і освоєння яких є одним з головних шляхів вдосконалення обладнання.

Для створення таких конструкцій важлива правильна організація процесу сушіння і вибір конструкції сушильного пристрою.

Велике значення в підвищенні ефективності процесу, економії матеріалів і енергії має збільшення концентрації складників, що наносяться. Багато сумішей, що наносяться як покриття, не можуть бути замінені разплавами, однак збільшення концентрації їх є необхідною умовою підвищення ефективності обладнання.

Покращуючи умови сушіння, збільшення концентрації створює додаткові труднощі в конструюванні наносних пристроїв, зокрема в забезпеченні точності шару, що необхідно враховувати при розробках.

Яким би за своїм складом і конструкцією не було обладнання, невід'ємною і головною частиною його є наносна апаратура та пристрої. З іншого боку, наносні пристрої і обраний спосіб нанесення покриттів великою мірою зумовлюють конструкцію обладнання, його продуктивність і інші техніко-економічні показники. Цим визначається важливість правильного вибору, проектування і експлуатації наносних пристроїв.

На рисунку 2 наведена узагальнююча класифікаційна схема наносних присторів, що застосовуються в різноманітних галузях промисловості для нанесення покриттів на рулонні текстильні матеріали.

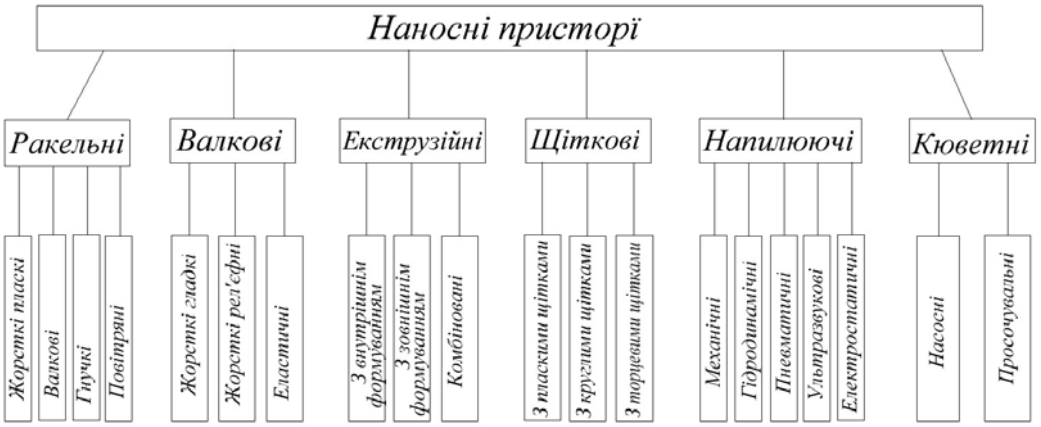


Рис. 2. Класифікація наносних пристроїв

Специфіка розпилювальних та електроосаджувальних пристроїв для нанесення

Серед усіх запропонованих типів нанесення найбільш цікавим для нашої роботи є напилюючі пристрої.

Напилювані пристрої використовують для нанесення покриттів на рулонні і штучні підкладки, в тому числі неправильної геометричної форми, з рифленою і перфорованою поверхнею.

Розпилення матеріалу здійснюють пневматичними, гідродинамічними, механічними, ультразвуковими і електростатичними розпилювачами. Часто для цих цілей застосовують стандартні разпилюючі головки, конструкції яких описані в спеціальній літературі. Характерною особливістю цих головок є те, що матеріал, який подається від них, розширюється в бік підкладки конусоподібним факелом. При цьому найбільша кількість матеріалу осідає в центральних перетинах основи конуса, а найменша - в перетинах, найбільш віддалених від центру. Тому для рівномірності розподілу матеріалу, головки встановлюють на каретках, що здійснюють зворотно-поступальний рух по ширині підкладки. З цією ж метою, а також для збільшення продуктивності кілька головок встановлюють в один або кілька рядів по ходу руху підкладки.

До недоліків описаних конструкцій слід віднести велику нерівномірність (до 30%) покриттів, великі непродуктивні витрати матеріалу, що наноситься, забруднення обладнання і зворотного боку підкладки.

Для нанесення покриттів на рулонні підкладки частіше всього використовують спеціальні розпилювачі, що утворюють плоский потік по всій ширині підкладки. Найбільш простим з них є механічний розпилювач, робочим органом якого є валковоподібні щітки або вали з рифленою поверхнею, що обертаються з частотою 300-1800 рад / с [1].

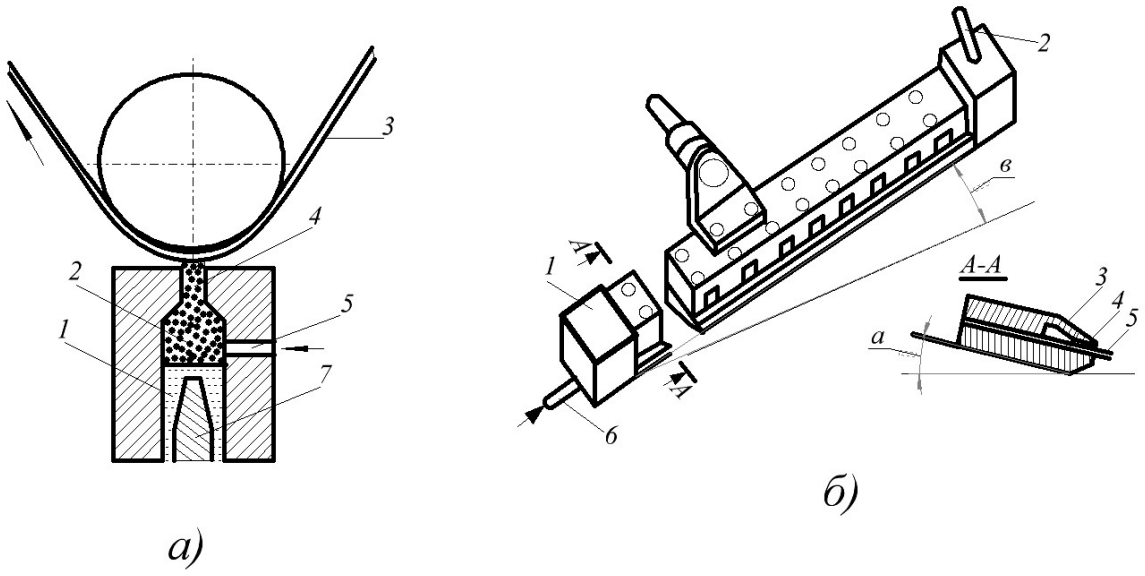


Рис. 3. Ультразвуковий (а) та електростатичний щільний (б) пристрої для нанесення

Останнім часом все більше застосування знаходять і ультразвукові розпилювачі [3–5]. Останні являють собою випромінювачі механічних коливань, з'єднані з генератором електричних коливань частотою від 15 кГц до 5 МГц. За допомогою ультразвукових розпилювачів можна одержувати покриття товщиною, що становить частки мікронів. На схемі, що зображена на рис.3-а вказані основні вузли пристрою: 1-матеріал, що наноситься; 2 – дрібнодисперсний шар суміші, що підіймається догори за допомогою потоку повітря з отвору 5; 3 – підкладка; 4 – вихідна щілина для суміші.

З метою отримання більш спрямованого потоку, економії матеріалу і збільшення адгезії до підкладки, між розпилювачем і підкладкою створюють електростатичне поле. Для цього на розпилювач подають позитивний заряд величиною до 60 кВ, а опорний вал заземлюють. Такі пристрої використовують, наприклад, при нанесенні клею, лаків і крохмалю на папір [6, 7].

Відомі розпилювачі [8], в яких перенесення матеріалу здійснюється тільки за рахунок електростатичного заряду.

Корпус щільного електростатичного розпилювача (рис. 3, б) складається з двох з'єднаних половинок, між якими встановлена стальна пластина 5 завтовшки 0,1-0,2 мм, що виступає з корпуса на 2 мм. Матеріал, який наноситься подається з торця корпуса через патрубок 6, розповсюджеється по каналу 3 й частково виходить з іншого торця через патрубок 2, рецеркулюючи по всій системі. В верхній половині корпусу є канали 4 для виходу матеріалу на коронуючу кромку пластини. Розпилювач з'єднують з джерелом високої напруги, а підкладку пропускають по заземленному валу, внаслідок чого між ними виникає електростатичне поле. Стікаючи з кромки пластини, заряд захоплює за собою дрібні частки матеріалу, що наноситься і переносить їх на підкладку. Розпилювач встановлюють під нахилом в двох, площинах: кут α = 15 °, кут β = 30-60 °. Певне обмеження в застосуванні електростатичних розпилювачів вносить те, що матеріал що наноситься повинен володіти певним питомим об'ємним опором.

До недоліків електростатичного напилення слід віднести його пожежовибухонебезпечність.

Ультразвукове розпилення та електростатичне осадження є найбільш перспективними в галузі дрібного та середнього промислового процесу отримання захисних покриттів на рулонних тканинах. Вони не вимагають використання великого об'єму розчину, конструктивно зменшується технологічна ділянка нанесення покриттів з огляду на відсутність ємностей з матеріалами.

Саме виходячи з недоліків електростатичного осадження, а також з вагомих переваг – відсутність вологого впливу на тканини, збереження початкової структури волокна, а також технічних можливостей сучасності, обумовлена кінцева форма пристрою, який слугуватиме базою в вузлі нанесення полімерного покриття. Для забезпечення пожежної та вибухової безпеки слід обирати інертні полімерні суміші, які не спричиняють розрядження в повітрі [9]. Також можна вважати поліететрафторетилен (ПТФЕ), який є чудовою мембранною та захисною сполукою. При використанні дрібнодисперсного порошку (розмір частки 25–50 мкм) він чудово може переноситись з поверхні наносного барабана на підкладку за допомогою статичноактивних часток. Сам ПТФЕ має майже нульовий електричний потенціал, є непоганим діелектриком. Певні варіації цього полімеру можуть сплавлятись при температурі 157 ^{0}С, що є допустимою для більшості натуральних тканин. В подальшому використання цих тканин можливе в військовій, службовій та навіть в побутових сферах життя.

Висновки

Для отримання нових властивостей в текстильних виробах найбільш економічним є нанесення полімерних покриттів на поверхню ще цілого рулону тканини. Таким чином можна варіювати процеси та

технології нанесення в залежності від подальших потреб. В загальних обрисах можна виділити найбільш популярні процеси нанесення, це ракельні, валкові та екструзійні. Всі вони передбачають великі технологічні лінії для нанесення, сушіння та змотування, складні процеси контролю за товщинами покриття, що наноситься на всіх технологічних щаблях. Якщо обирати розпилюючі пристрої нанесення, то основною проблемою є контроль самого покриваючого матеріалу, так як він має бути дрібнодисперсним, однакового розміру та щільності. Досягти таких характеристик можливо лише за допомогою якісного матеріалу, що використовуємо. Ще одним з недоліків саме процесу електростатичного осадження є необхідність застосування специфічного обладнання, що дозволить наносити статичнонеактивні порошкові суміші, що тягне за собою певні витрати на проектування та виготовлення обладнання. Перевага останніх – можливість реалізації малих та середніх підприємств текстильної промисловості для отримання специфічних якостей тканин, швидкого переобладнання установки на інакші за характеристиками покривні матеріали, а також отримання надтонких плівок за рахунок коригування кількості нанесеної суміші.

Література

1. Пегловський В.Л. Обладнання для нанесення полімерних покриттів на рулонні та штучні матеріали / Пегловський В.Л., Піскорський Г.А. – К. : Техніка, 1981. – 189 с.

2. Sen A.K., Tech M. Coated textiles. Principles and Applications. – Technomic publishing co., inc., 2001.

3. Пат. 2012141991A Російська Федерація МПК B05B12/14. Распылитель и способ нанесения однокомпонентных и многокомпонентных средств покрытия / Манфред МИХЕЛЬФЕЛЬДЕР Бернхард ЗАЙЦ Франк ХЕРРЕ. – № 2012141991A ; заявл. 15.05.2006 ; опубл. 2015-11-10

4. Пат. RU2008149126A Російська Федерація, МПК B05C5/0225. Устройство для нанесения покрытия / Франк ХЕРРЕ (DE) Франк ХЕРРЕ. – № 2008149126A ; заявл. 15.05.2006 ; опубл. 2011-09-27

5. Пат. RU2006142442A Російська Федерація, МПК B05B12/14. Способ распыления жидкости и устройство для его осуществления / Юрий Анатольевич Крамаров (RU), Юрий Анатольевич Крамаров, Александр Анатольевич Панич (RU), Александр Анатольевич Панич. – № RU2006142442A ; заявл. 130.11.2006 ; опубл. 20.10.2008

6. Пат. RU2011108653A Російська Федерація, МПК C09B 127/24. Поливинилхлоридный (перхлорвиниловый) лак с улучшенными характеристиками / Дмитрий Николаевич Кондратьев, Виктор Вольфович Гольдин. – № RU2491310C2 ; заявл. 09.03.2011 ; опубл. 27.08.2013.

7. Пат. 3536880A США, МПК B23H1/02 Method and apparatus for machining through intermittent electric discharges / Rhyner Heinz. – № CA1003052A1 ; заявл. 4.03.1965 ; опубл. 27.10.1970.

8. Порошковые краски. Технология покрытий / ЗАО "Промкомплект" – Санкт-Петербург : ХИМИЗДАТ, 2001. – 256 с.

9. Шевченко В.Г. Основы физики полимерных композиционных материалов : учебное пособие для студ. / Шевченко В.Г. – Москва, 2010.

References

1. Pehlovskyi V.L., Piskorskyi H.A. Obladnannia dlia nanesennia polimernykh pokryttiv na rulonni ta shtuchni materialy(ros.). – K.: Tekhnika, 1981. – 189 s.

2. Sen A.K., Tech M. Coated textiles. Principles and Applications. – Technomic publishing co., inc., 2001 year.

3. Pat. 2012141991A Rosiyska Federatsiya MPK B05B12/14 Raspylitel i sposob naneseniya odnokomponentnykh i mnogokomponentnykh sredstv pokrytiya / Manfred MIKhELFELDER Bernkhard ZAYTs Frank KhERRE № 2012141991A; Zayavl. 15.05.2006; Opubl. 2015-11-10

4. Pat. RU2008149126A Rosiyska Federatsiya. MPK B05C5/0225 Ustroystvo dlya naneseniya pokrytiya / Frank KhERRE (DE) Frank KhERRE. - № 2008149126A; Zayavl. 15.05.2006; Opubl. 2011-09-27

5. Pat. RU2006142442A Rosiyska Federatsiya. MPK B05B12/14 Sposob raspyleniya zhidkosti i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya / Yuriy Anatolyevich Kramarov (RU) Yuriy Anatolyevich Kramarov Aleksandr Anatolyevich Panich (RU) Aleksandr Anatolyevich Panich. - № RU2006142442A; Zayavl. 130.11.2006; Opubl. 20.10.2008

6. Pat. RU2011108653A Rosiyska Federatsiya. MPK C09B 127/24 Polivinilkhloridnyy (perkhlorvinilovyy) lak s uluchshennymi kharakteristikami / Dmitriy Nikolayevich Kondratyev, Viktor Volfovich Goldin. - № RU2491310C2; Zayavl. 09.03.2011; Opubl. 27.08.2013

7. Pat. RU2011108653A Rosiyska Federatsiya. MPK C09B 127/24 Polivinilkhloridnyy (perkhlorvinilovyy) lak s uluchshennymi kharakteristikami / Dmitriy Nikolayevich Kondratyev Viktor Volfovich Goldin. - № RU2491310C2; Zayavl. 09.03.2011; Opubl. 27.08.2013

8. Poroshkovye kraski. Tekhnologiya pokrytiy ZAO "Promkomplekt" - Sankt-Peterburg. KhIMIZDAT. 2001 g. - 256 s.

9. Shevchenko V.G. Osnovy fiziki polimernykh kompozitsionnykh materialov. Uchebnoye posobiye dlya studentov po spetsialnosti «Kompozitsionnyye nanomaterialy». Moskva, 2010.

Рецензія/Peer review : 06.11.2017 р. Надрукована/Printed :07.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Скиба М.Є.

УДК 678.025

Н.М. ЗАЩЕПКІНА
Київський технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

ТЕМПЕРАТУРНІ ДЕФОРМАЦІЇ ОРІЄНТОВАНИХ ПЛІВОК

Розглянута поведінка полімерних матеріалів в полі під впливом температур з широкого діапазону. Проводилися дослідження залежності деформації усадки та деформацій зразків ПЕТФ плівки від температури. Для дослідження зміни деформації усадки температура змінювалась в діапазоні від 20°С до 80°С, а для дослідження зміни температурної деформації зразків – від 20°С до 140°С.

Встановлено, що при підвищенні температури приблизно до 70-73^{0}С, процес лінійного розширення переважає над процесом усадки, при подальшому підвищенні температури процеси зрівнюються, а потім спостерігається інтенсифікація процесу усадки та його переважання. В інтервалі температур 30-60^{0}С залежність незворотних усадочних деформацій від температури може бути прийнята з похибкою ±15% у вигляді лінійної функції.

Отриманий аналітичний вираз для визначення температури усадки, аналіз якого показує, що із зростанням величини напруження, що прикладається до матеріалу, температура усадки буде підвищуватись, а підвищення ступеня орієнтації витяжки повинно привести до зниження температури усадки. Цей висновок має велике значення для запобігання розвитку термоусадкових деформацій в рулонованих виробах з орієнтованих матеріалів.

Ключові слова: полімерна плівки, орієнтація, усадка, температура, напруження, деформація

N.M. ZASHEPKINA
Kyiv Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

TEMPERATURE DEFORMATION OF ORIENTED FILMS

The behavior of polymeric materials in the field under the influence of wide range temperatures is considered. Dependence of deformation of shrinkage and deformation of polyethylene terephthalate film samples from temperature is carried out. To study the change in shrinkage deformation, the temperature has varied in the range from 20°C to 80°C, and to study the change in temperature deformation of samples - from 20°C to 140°C.

It has been established that when the temperature rises to about 70-730 ° C, the process of linear expansion prevails over the process of shrinkage, with further increase of temperature the processes equalize, and then there is an intensification of the shrinkage process and its predominance. In the temperature range 30-600 °, the dependence of irreversible shrinkage deformations on temperature can be assumed with an error in the form of a linear function.

An analytical expression is obtained for determining the temperature of shrinkage, the analysis of which shows that as the magnitude of the strain applied to the material increases, the shrinkage temperature will increase, and an increase in the orientation of the extract should lead to a decrease in the temperature of shrinkage. This conclusion is of great importance for preventing the development of shrinkage deformations in rolled products made out of oriented materials.

***Key words**: polymer films, orientation, shrinkage, temperature, strain, deformation*

Вступ

В роботі [1, 2] в якості прикладу показано зміну відносної деформації зразків ПЕТФ (ступінь витяжки $\lambda = 2{,}0$) в процесі зміни температури за вище наведеною програмою. Показано, що залежність відносної деформації від температури в загальному випадку є нелінійною, що вказує на протікання при нагріванні як процесу лінійного розширення, так і процесу укорочення чи усадки ПЕТФ плівки.

В процесі витримки зразків при граничних значеннях температури процес термічної усадки не стабілізується, а продовжує протікати в часі зі швидкістю, яка зростає приблизно пропорційно величині граничної температури нагріву і стабілізації. При подальшому охолодженні зразок не повертається у вихідний стан, що виражається у невідповідності між температурними деформаціями при нагріванні та охолодженні, і як наслідок виникнення петлі температурного гістерезису. Площа петлі температурного гістерезису також значно залежить від температури випробування і відбиває зміну внутрішньої енергії плівки, накопиченої в процесі отримання матеріалу методом орієнтованої витяжки.

Основна частина

Проводилися дослідження залежності деформації усадки від температури та температурних деформацій зразків ПЕТФ плівки. Вимірювання проводилися на дослідній установці і за методикою, що наведена в роботі [1]. Дослідження впливу температури на деформативність орієнтованих плівок проводилось в інтервалі температур Т=20^{0}С-220^{0}С. Випробування проводились на дослідній установці [3] за наступною програмою [2, 3, 4]: підвищення температури зі швидкістю 1 град/хв. до температури 30^{0}С, 40^{0}С, 50^{0}С, 60^{0}С, 70^{0}С, 80^{0}С і т.д. з витримкою при цих температурах протягом 60 хвилин і подальшого охолодження до Т=20^{0}С; при кожній граничній температурі, як правило, випробовувалось по 12 зразків з довжиною робочої частини $l_0 = 250$ мм.

Виміряні, після зняття дії температурного поля, деформації усадки ε_y дозволили побудувати залежність незворотних усадочних деформацій, що виникають в ПЕТФ плівках при температурі Т=20^{0}С після впливу на них теплового поля відповідної температури (рис. 1).

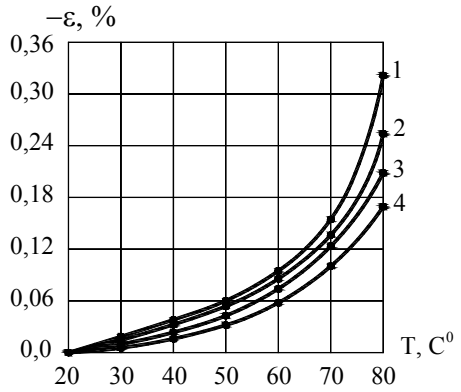


Рис. 1. Залежність незворотних деформацій усадки ПЕТФ плівки "Д" (крива 1), плівки "В" (крива 2), плівки "Т" (крива 3) і плівки "Р" (крива 4) від температури

Тут крива 1 характеризує залежність термоусадочних деформацій плівки «Д», крива 2 - термоусадочних деформацій плівки «В», крива 3 - термоусадочних деформацій плівки «Т», крива 4 - термоусадочних деформацій плівки «К» від температури випробування. Аналіз отриманих даних показує, що в інтервалі температур 30-60^{0}С залежність незворотних усадочних деформацій ε_y від температури може бути прийнята з похибкою ±15% у вигляді лінійної функції.

При подальшому підвищенні температури спостерігається різке підвищення термоусадочних деформацій, причому ця залежність носить експоненційний характер.

Після впливу теплового поля температурою Т=80^{0}С, за описаною вище програмою, в ПЕТФ плівках виникають незворотні термоусадочні деформації ε_y рівні: для плівки «Д» $\varepsilon_y = 0{,}36\%$, для плівки «В» $\varepsilon_y = 0{,}29\%$, для плівки «Т» $\varepsilon_y = 0{,}22\%$, і для плівки «К» $\varepsilon_y = 0{,}18\%$ = 0, 18%. Для поліімідних та поліетиленових плівок отримані аналогічні результати.

На рис. 2 представлені усереднені криві температурних деформацій при рівномірному нагріванні зі швидкістю 1^{0}С/хв зразків ПЕТФ плівок, які отримані у неорієнтованому стані (крива 1), при ступені повздовжньої орієнтації $\lambda_1 = 2{,}0$ (крива 3), при ступені повздовжньої орієнтації $\lambda_1 = 3{,}35$ (крива 4). Крива 2 характеризує температурні деформації, зазначених вище плівок, виміряні в поперечному напрямку $0x_3$.

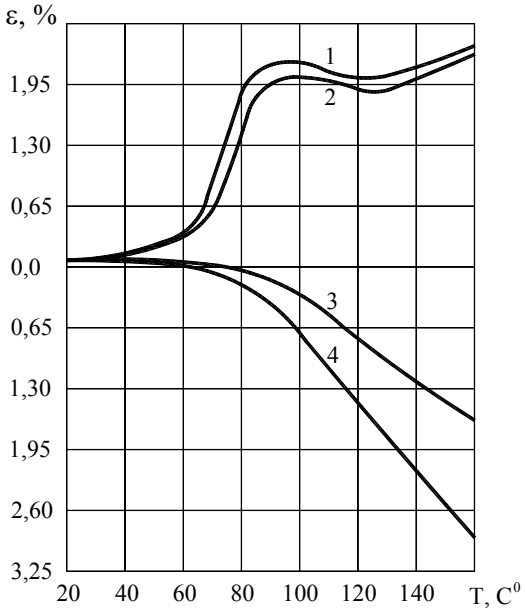


Рис. 2. Залежності температурних деформацій зразків ПЕТФ плівок, що отримані в неорієнтованому стані (крива 1), при ступені повздовжньої орієнтації $\lambda = 2{,}0$ (крива 3), $\lambda = 3{,}5$ (крива 4) і для зразків орієнтованих плівок, що вирізані в поперечному напрямку

З рис. 2 випливає, що із збільшенням ступеня витяжки λ_1, процес термоусадки починає переважати над процесом лінійного розширення і саме в напрямку витяжки $0x_1$. В напрямку поперечному до напрямку витяжки процес термоусадки практично не спостерігається (крива 2), а розвиток температурних деформацій відповідає ізольованому неорієнтованому стану полімеру.

Таким чином проведені дослідження показують, що значення незворотних термоусадочних деформацій, що виникають в ПЕТФ плівках внаслідок дії теплового поля залежать не тільки від його температури, але й від ступеня витяжки матеріалу, а також від часу впливу на матеріал. Це пояснюється «стягуючою» дією ентропійних сил, зростаючих пропорційно до температури в аморфних ділянках полімерів і рекристалізаційним процесам.

Порівнюючи результати, які наведені на рис. 1 та рис. 2 бачимо, що дія «стягуючих» ентропійних сил співмірна з навантаженнями, які виникають в процесі експлуатації плівок та магнітних стрічок на їх основі.

Дослідження, які були проведені в [3-5] показали, що от жиг плівок дозволяє виключити термоусадку, дає можливість визначити коефіцієнти лінійного розширення плівок, при цьому підвищується загальний ступінь орієнтації макромолекул, що проявляється в збільшенні модуля пружності на 10-15%, при незмінному характері анізотропії. Підвищення модуля пружності супроводжується підвищенням ступеня кристалічності матеріалу і загального ступеня орієнтації макромолекул в аморфних областях [5]. Так як встановлено, що тільки 15-30% прохідних макромолекул безпосередньо реагують на навантаження, то, по всій ймовірності, при досягненні відповідного енергетичного стану відбувається скорочення перенапружених молекул і перерозподіл напруг між навантаженими макромолекулами. Прояв усадки, при

цьому, ніби пов'язаний із переходом прохідних перенапружених молекул аморфних і міжфібрилярних областей в наступний рівноважний стан з меншим енергетичним рівнем. Ймовірність переходу напружених молекул з більш високого енергетичного рівня (рівень 1) в стан з меншим енергетичним рівнем (рівень 2) може бути виражено згідно канонічному розподілу Гібса у вигляді [5]

$$\omega_{12} = A_1 \exp\left(-\frac{\Delta G_1}{RT}\right), \quad (1)$$

де A_1 – константа, що вибирається за умови нормування ймовірностей (при дискретних станах $A_1 \sum_{i=1}^{n} \omega_i = 1$); ΔG_1 – величина активаційного бар'єру, який необхідний для переходу ділянкою макромолекул з одного енергетичного стану в інший; R – універсальна газова постійна; T – абсолютна температура.

Ймовірність зворотного переходу сегментів макромолекул з рівня 2 на рівень 1 визначається аналогічно.

$$\omega_{21} = A_2 \exp\left(-\frac{\Delta G_2}{RT}\right). \quad (2)$$

В рівняннях (1) і (2) ω_{12} і ω_{21} – ймовірності зміни внутрішнього енергетичного стану матеріалу при переході з одного енергетичного рівня на інший.

При пружному розтягненні орієнтованих полімерів поздовжній розмір кристалічних областей уздовж полімерного ланцюга залишається незмінним [4, 5].

Так як модулі пружності кристалів мають дуже великі значення ($E_c = 240 - 250 \cdot 10^3$ МПа), то переважна частка пружного подовження зосереджена в аморфних областях мікрофібрил. При пружній, зворотній деформації орієнтованих полімерів відбуваються конфірмаційні зміни в макромолекулах аморфних областей, тобто виникають гош-транс-переходи [3, 5]. В орієнтованих полікапроаміду, поліетилену і ПЕТФ лінійно зменшуються інтенсивності інфрачервоних смуг поглинання, які відповідають нерегулярним ділянкам макромолекул, і також лінійно зростають інтенсивності смуг поглинання для ділянок макромолекул в транс-конформації. Лінійне зменшення числа поворотних ізомерів у згорнутих конформаціях свідчить про випрямлення макромолекул із зростанням деформації полімерів. Для кожного значення деформації збільшення числа транс-ізомерів приблизно дорівнює зменшенню гош-ізомерів, що свідчить про перехід згорнутих гош-ізомерів у витягнуті транс-ізомери в аморфних областях. Це дозволяє вважати, що у всякому разі частина зворотної деформації орієнтованих полімерів зумовлена механізмом поворотно-ізомерних перетворень.

Форми смуг поглинання інфрачервоного спектру в ненавантаженому полімері симетричні, всі сегменти макромолекул знаходяться приблизно в однакових енергетичних станах, а лінії поглинання, що їм відповідають, мають приблизно одну частоту в спектрі [5]. Додавання механічної напруги змінює енергетичний стан сегментів макромолекул в аморфних областях, що призводить до зміщення частоти міжатомних коливань. Знак зміщення залежить від напрямку механічної сили: стискання збільшує частоту, а розтягування зменшує її, при цьому зміщення частоти прямо пропорційно силі [3].

Таким чином, місцеву мікродеформацію можна розглядати як перехід окремого сегмента макромолекули з одного енергетичного стану в інший. Місцева мікродеформація викладає локальні місцеві мікронапруження, які, в свою чергу, шумуючись деформують весь мікрооб'єм.

Для неорієнтованого ізотропного ненапруженого аморфно-кристалічного полімеру переходи сегментів макромолекул з одного енергетичного рівня на інший і назад є рівноможливими, їх ймовірності появи на різних енергетичних рівнях рівні між собою і дорівнюють 0,5.

$$\omega_{12} = \omega_{21} = A \exp\left(-\frac{\Delta G_0}{RT}\right) = 0{,}5\,. \quad (3)$$

Таким чином, енергетична крива має симетричний вигляд, тобто в системі присутня термодинамічна рівновага між кількістю гош- і транс-ізомерів, причому це пов'язано з розвитком деформації. Так як зміщення енергетичного стану dG прямо пропорційно прикладеній напрузі σ, то можна записати, що напруга $\delta\sigma$ зумовила лінійне зміщення рівнів вільної енергії в сусідніх положеннях ізомерів, так , що

$$dG = \delta G\,. \quad (4)$$

Ймовірності граничних переходів при дії зовнішньої напруги і температурного поля $Q = f(T - T_0)$ визначається значеннями для переходу гош-ізомерів в транс-ізомери:

$$\omega_{12} = A_1 \exp\left(-\frac{G_0 - \delta\sigma}{R \cdot (T - T_0)}\right). \quad (5)$$

і для переходу транс-ізомерів в гош-ізомери, як

$$\omega_{21} = A_2 \exp\left(-\frac{G_0 + \delta\sigma}{R \cdot (T - T_0)}\right). \quad (6)$$

Якщо позначити число навантажених ізомерів прохідних молекул через N_G, число навантажених ізомерів, які знаходяться в енергетичному стані гош-ізомерів через n_G, то ймовірність того, що в системі буде здійснюватись граничний перехід гош-ізомерів в транс-ізомери можна виразити таким чином:

$$\omega_1^0 = \frac{n_G}{N\sigma}, \quad (7)$$

а ймовірність того, що в системі буде відбуватись граничний перехід транс-ізомерів в гош-ізомери можна виразити, як

$$\omega_2^0 = \frac{N_\sigma - n_G}{N_\sigma} = 1 - \omega_1^0. \quad (8)$$

Якщо розглядати вихідний стан як рівноважний, то ймовірність зміни енергетичного стану системи, що супроводжується переходом гош-ізомерів в транс-ізомери (рівень 1), в наслідок прикладання напруги, в порівнянні з рівноважним можна виразити з урахуванням (3), як

$$\omega_1 = \omega_1^0 + \frac{1}{2} = \frac{1}{2} + \frac{n_G}{N\sigma}. \quad (9)$$

На підставі теореми про додавання ймовірностей, ймовірність зміни енергетичного стану системи, що супроводжується граничним переходом транс-ізомерів в гош-ізомери (рівень 2), в наслідок прикладання механічної напруги, в порівнянні з рівноважним можна виразити, як

$$\omega_2 = \omega_2^0 - \frac{1}{2} = \frac{1}{2} - \frac{n_G}{N\sigma}. \quad (10)$$

Введемо поняття коефіцієнта енергетичного стану матеріалу у вигляді

$$\eta = \frac{n_G}{N\sigma}. \quad (11)$$

Підставляючи (11) в (9) і (10) отримуємо

$$\omega_1 = \frac{1}{2} + \eta, \quad (12)$$

$$\omega_2 = \frac{1}{2} - \eta. \quad (13)$$

З розгляду (5) і (12) бачимо, що ймовірність суміщення граничного переходу гош-ізомерів в транс-ізомери та зменшення енергетичного рівня (підвищення внутрішньої енергії системи) можна визначити з теореми множення ймовірностей

$$W_{12} = \omega_{12} \cdot \omega_2 = \omega_{12} \cdot \left(\frac{1}{2} + \eta\right). \quad (14)$$

Аналогічно з (6) і (13) випливає, що ймовірність суміщення граничного переходу транс-ізомерів в гош-ізомери та збільшення енергетичного рівня (зменшення внутрішньої енергії системи) можна виразити у вигляді

$$W_{12} = \omega_{12} \cdot \omega_2 = \omega_{21} \cdot \left(\frac{1}{2} - \eta\right). \quad (15)$$

Для ізотропного, недеформованого і ненавантаженого стану матеріалу, у відсутності дії температурного поля, коефіцієнт енергетичного стану матеріалу дорівнює нулю $\eta = 0$, так як дорівнює нулю число навантажених ізомерів. Під дією силового та температурного полів коефіцієнт енергетичного стану може змінюватись в часі від $\eta = 0$ до $\eta = \frac{1}{2}$. Зміну енергетичного стану системи в часі можна виразити як

$$\frac{d\eta}{dt} = W_{12} - W_{21} = \omega_{12} \cdot \left(\frac{1}{2} + \eta\right) - \omega_{21} \cdot \left(\frac{1}{2} - \eta\right). \quad (16)$$

Підставляючи вирази (5), (6) в (16) отримаємо диференційний закон ймовірнісного енергетичного стану ізотропної неорієнтованої аморфної області міжаферолітного простору

$$\frac{d\eta}{dt} = A_1 \exp\left(-\frac{\Delta G - \delta\sigma}{R \cdot (T - T_0)}\right) \cdot \left(\frac{1}{2} + \eta\right) - A_2 \exp\left(-\frac{\Delta G + \delta\sigma}{R \cdot (T - T_0)}\right) \cdot \left(\frac{1}{2} - \eta\right). \quad (17)$$

Для орієнтованого стану, який є нерівноважним, енергетична крива має несиметричний вигляд і ймовірність переходу сегментів прохідних молекул під дією температурного поля в наступний квазірівноважний стан з меншим енергетичним рівнем більша, ніж в зворотному напрямку. При цьому прямий напрямок характеризується скороченням перенапружених ділянок макромолекул і перерозподілом

напруг між навантаженими молекулами, а зворотний – подовженням і підвищенням напруг в перпендикулярних ділянках макромолекул.

При впливі силового поля зменшується різниця в енергетичних рівнях і збільшується ймовірність переходу структурно-кінетичних одиниць (гош- і транс-ізомерів) в зворотному напрямку, тобто в напрямку подовження та підвищення напруженості ділянок прохідних макромолекул.

Здатність орієнтованих аморфно-кристалічних полімерів незворотно скорочуватись без зовнішнього силового впливу та під впливом температурного поля свідчить про те, що внутрішня структура знаходиться в напруженому стані й володіє певним запасом внутрішньої енергії. Якщо рівень 1 відповідає енергетичному стану орієнтованого полімеру до впливу температурного поля (вихідний стан), а рівень 2 відповідає енергетичному стану після впливу температурного поля, то величину енергетичного (активаційного) бар'єру в прямому напрямку, тобто в напрямку зменшення енергетичного рівня можна виразити, як

$$G_{12} = G_0 - \Delta U + \delta\sigma\,, \tag{18}$$

а величину енергетичного бар'єру в зворотному напрямку, тобто в напрямку збільшення енергетичного рівня можна виразити, як

$$G_{21} = G_0 + \Delta U - \delta\sigma\,, \tag{19}$$

де G_0 – величина активаційного бар'єру конформентів, що відповідає ізотропному неорієнтованому стану у відсутності силового та температурного полів; ΔU – зміна енергетичного рівня системи (внутрішньої енергії), внаслідок набуття полімером орієнтованого стану.

Тоді диференційний закон ймовірнісного енергетичного стану орієнтованого аморфно-кристалічного тіла буде мати вигляд

$$\frac{d\eta}{dt} = A_1 \exp\left(-\frac{G_0 - \Delta U + \delta\sigma}{R\cdot(T - T_0)}\right)\cdot\left(\frac{1}{2} + \eta\right) - A_2 \exp\left(-\frac{G_0 - +\Delta U - \delta\sigma}{R\cdot(T - T_0)}\right)\cdot\left(\frac{1}{2} - \eta\right). \tag{20}$$

Так як причиною прояву термоусадочних деформацій є температурне поле, то досліджуємо рівняння (20) при дії постійної напруги та зміною температури з постійною швидкістю

$$T = T_0 + bt\,, \tag{21}$$

де T_0 – температура квазірівноважного стану орієнтованого полімеру (технологічна температура переохолодження при орієнтації полімеру); b – швидкість зміни температурного поля.

Похідна від температури (21) за часом можна виразити рівнянням

$$\frac{dT}{dt} = b\,, \tag{22}$$

Розглянемо систему рівнянь

$$\begin{cases} \dfrac{d\eta}{dt} = A_1 \exp\left(-\dfrac{G_0 - \Delta U + \delta\sigma}{R\cdot(T - T_0)}\right)\cdot\left(\dfrac{1}{2} + \eta\right) - A_2 \exp\left(-\dfrac{G_0 - +\Delta U - \delta\sigma}{R\cdot(T - T_0)}\right)\cdot\left(\dfrac{1}{2} - \eta\right), \\ \dfrac{dT}{dt} = b. \end{cases} \tag{23}$$

Розділивши ліву та праву частину рівняння (20) відповідно на ліву та праву частину рівняння (22), отримаємо

$$\frac{d\eta}{dT} = \frac{1}{b}\left[A_1 \exp\left(-\frac{G_0 - \Delta U + \delta\sigma}{R\cdot(T - T_0)}\right)\cdot\left(\frac{1}{2} + \eta\right) - A_2 \exp\left(-\frac{G_0 - +\Delta U - \delta\sigma}{R\cdot(T - T_0)}\right)\cdot\left(\frac{1}{2} - \eta\right)\right]. \tag{24}$$

Розглядаючи граничні переходи конформентів макромолекул з одного енергетичного стану в інший, як елементарний механізм мікродеформації, додавання яких по об'єму призводить до розвитку макродеформації, можна дійти до висновку – чим більше ділянок макромолекул знаходяться на енергетичному рівні в напрямку деформації, тим більш інтенсивно буде розвиватися деформація і тим нижчою величина напруги, яка необхідна для досягнення відповідної деформації, що можливо і пояснює залежність модуля пружності від напруги та ступеня орієнтації.

Таким чином, можна стверджувати, що між коефіцієнтом енергетичного стану η і деформацією ε існує функціональна залежність виду $\varepsilon = f(\eta)$, яка в загальному випадку є, вочевидь, нелінійною.

Розглянемо поведінку орієнтованого аморфно-кристалічного полімеру, приймаючи, що між деформацією ε і коефіцієнтом енергетичного стану матеріалу η існує пряма пропорційність, тобто $\varepsilon = a\eta$. Очевидно, що

$$\frac{d\varepsilon}{dT} = a\frac{d\eta}{dT}, \qquad \frac{d\eta}{dT} = \frac{1}{a}\frac{d\varepsilon}{dT}. \tag{25}$$

Підставляючи (25) в (22) отримаємо

$$\frac{d\varepsilon}{dT} = \frac{a}{b}\left[A_1 \exp\left(-\frac{G_0 - \Delta U + \delta\sigma}{R\cdot(T - T_0)}\right)\cdot\left(\frac{1}{2} + \eta\right) - A_2 \exp\left(-\frac{G_0 - +\Delta U - \delta\sigma}{R\cdot(T - T_0)}\right)\cdot\left(\frac{1}{2} - \eta\right)\right]. \tag{26}$$

При температурі, яка дорівнює температурі усадки $T = T_y$ спостерігається екстремум залежності від температури. Прирівнюючи першу похідну $\frac{d\varepsilon}{dT} = 0$, отримаємо $\frac{a}{b} \neq 0$ і

$$A_1\left(\frac{1}{2}+\eta\right)\exp\left(-\frac{G_0-\Delta U+\delta\sigma}{R\cdot(T-T_0)}\right)-A_2\left(\frac{1}{2}-\eta\right)\exp\left(-\frac{G_0-+\Delta U-\delta\sigma}{R\cdot(T-T_0)}\right)=0. \quad (27)$$

Логарифмуючи вираз (27) і виконуючи відповідні перетворення отримаємо вираз для визначення температури усадки

$$T_y = T_0 + \frac{2\cdot(\delta\sigma-\Delta U)}{R\cdot\ln\frac{A_1(1/2+\eta)}{A_2(1/2-\eta)}}. \quad (28)$$

Висновки. Аналіз рівняння (28) показує, що із зростанням величини напруги σ, що прикладається до матеріалу, температура усадки буде підвищуватись, а підвищення ступеня орієнтації витяжки λ повинно привести до зниження температури усадки. Цей висновок має велике значення для запобігання розвитку термоусадкових деформацій в рулонованих виробах з орієнтованих матеріалів, які повинні бути намотані таким чином, щоб окружні напруги у витках рулону залишались додатніми, одного знаку і щоб їх величина не опускалася нижче значення напруги, при якому температура усадки відповідно до рівняння (28) буде перевищувати температуру експлуатації рулонованого виробу.

References

1. Buckley C. P. The thermal expansion between 0 and 290°C / C. P. Buckley, N. G. Mecrumm // J. Materials Sci. – 2016. – Vol. 8. – № 8. – P. 1123-1135.
2. Takayanagi M. Mechanical properties and fine structure of draw polymers / M. Takayanagi, K. Imada, T. Kajiyama // J. Polymer Sci. – 2006. – Part C. – № 15. – P. 263-281.
3. Darlingron M. W. Mechanical and structural studies of low density polyethylene / M. W. Darlingron, B. H. Conkey, D. W. Saunders // J. Materials Sci. – 2015. – Vol. 6. – № 12. – P. 1447-1464.
4. Bucley C. P. Elastic and thermal expansion anisotropy of oriented linear polyethylene / C. P. Bucley // J. Materials Sci. – 2004. – Vol. 9. – № 1. – P. 100-108.
5. Ladiesky N. M. Measurement of oriented low-density polyethylene / N. M. Ladiesky, I. M. Ward // J. Macromolecular Sci. – 2010. – Part B. – Vol. 5. – № 4. – P. 745-773.

Рецензія/Peer review : 16.11.2017 р. Надрукована/Printed :07.12.2017 р.
Статтю представляє д.т.н., проф. Защепкина Н.М.

УДК 678.023.5

О.М. СИНЮК
Хмельницький національний університет

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ ТА СТУПЕНЯ ВИТЯЖКИ ПОЛІМЕРУ НА ЙОГО МІЦНІСТЬ

На підставі детального аналізу існуючих методів розроблено та застосовано методи, які дозволили визначити у широкому температурно-часовому діапазоні необхідні технологічні властивості полімерних матеріалів. До складу комплексу входить ряд дослідних установок, що дозволяють досліджувати повзучість, релаксацію напружень, короткочасну і тривалу міцність, динамічні модулі пружності і декременти згасання при поздовжніх і крутильних коливаннях, параметри будови макроструктури полімерних матеріалів, у широкому інтервалі температур (20…200^{0}C).

Наведено принципи роботи пристроїв і описані методи визначення в'язкопружних властивостей, які необхідні для визначення технологічних параметрів переробки полімерних відходів легкої промисловості.

Отримані функціональні залежності ступеня витяжки та температури нагрівання полімерного матеріалу на його міцність в протилежних напрямках до попередньої орієнтації його структури. За допомогою отриманих виразів можна визначати мінімальні зусилля перероблюючого обладнання, при яких забезпечується руйнування структури полімеру, що є важливим з точки зору енергоефективності даного обладнання.

Ключові слова: *полімер, структура, витяжка, температура, напруження, деформація.*

O.M. SYNYUK
Khmelnytskyi National University

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF IMPACT OF TEMPERATURE AND THE DEGREE OF POLYMER DRAWING ON ITS DENSITY

Based on a detailed analysis of existing methods, methods have been developed and applied that allowed to determine the technological properties of polymeric materials in a wide temperature-time range. The complex includes a number of research facilities that allow to study creep, relaxation of strains, short and long-term density, dynamic moduli of elasticity and decrements of fading in longitudinal and torsional oscillations, the structural parameters of the macrostructure of polymeric materials, in a wide temperature range (20…200^{0}C) .

The principles of operation of devices and methods of determination of viscoelastic properties, necessary for definition of technological parameters of recycling of polymeric waste of light industry, are described.

The functional dependences of the degree of drawing and the temperature of heating the polymeric material on its strength in opposite directions to the previous orientation of its structure are obtained. With the help of the obtained expressions it is possible to determine the minimum efforts of the recycling equipment, which provides the destruction of the polymer structure, which is important in terms of energy efficiency of the equipment.

Key words: polymer structure, drawing, temperature, strain, deformation.

Вступ

Для перевірки результатів теоретичних досліджень впливу температури і ступеня витяжки полімерного матеріалу на його фізико-механічні властивості [1–3] були проведені експериментальні випробування попередньо розтягнутих полімерних зразків.

Для визначення параметрів дослідження була проаналізована апріорна інформація [4], на основі чого за контрольовані параметри б ули вибрані такі фізико-механічні характеристики полімерного матеріалу як міцність на розрив при розтягу в поперечному до напрямку попередньої витяжки, динамічні модулі пружності та зсуву. За фактор, який будемо варіювати, був прийнятий ступень попередньої витяжки полімерного матеріалу λ. Ступень попереднього витягування полімерного матеріалу будемо варіювати в межах від 1 до 3.

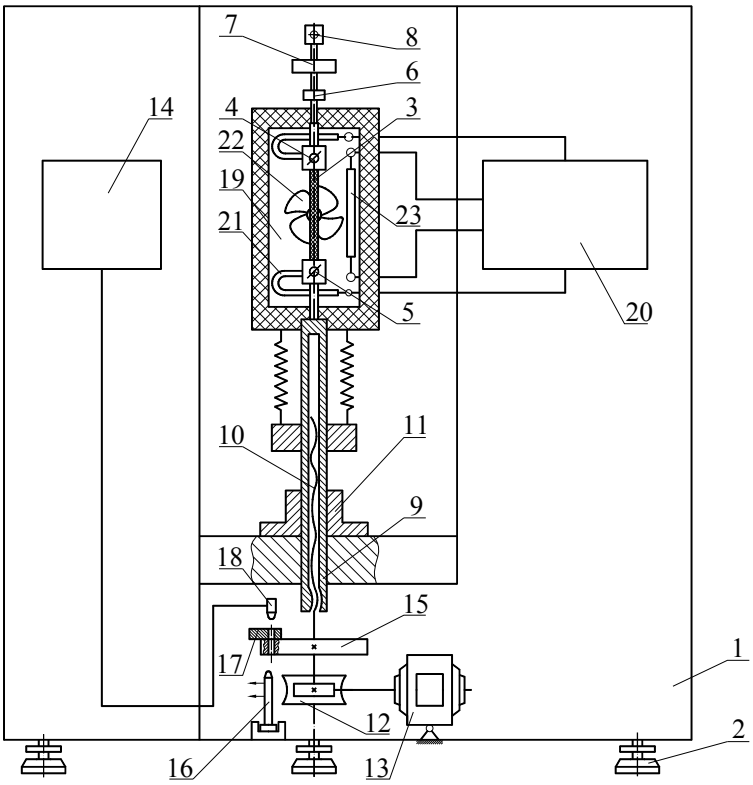
Вибір матеріалу зразка здійснювався виходячи з номенклатури полімерів, які отримали широке використання в легкій промисловості. Для проведення експериментальних досліджень були вибрані такі матеріали та їх марки: полівінілхлорид (ПВХ), марка: ОПЛП-2; поліетилен (ПЕ), марка: 20108-075; поліпропілен (ПП), марка: 1365 S; поліамід (ПА), марка ПА-6-130.

Заготовки на зразки для випробування отримували з полімерних виробів, які виготовлялися литтям під тиском на термопластавтоматі моделі Б2С/14Е. Для одержання заготовок для зразків однакової товщини їх обробляли на обладнанні ДН-2-0. Товщина зразків згідно до вимог стандартів випробування має бути однаковою по всій площині зразків.

Після вирівнювання заготовок по товщині за допомогою спеціально виготовлених різаків на пресі ПВГ-8-0 із заготовок вирубали зразки, які мали розміри та форму згідно з вимогами стандартів випробування.

Опис експериментальної установки

Випробування проводилися на дослідній установці (рис. 1), яка призначена для досліджень матеріалів на розтяг в широкому температурному діапазоні – 20…200°C [5]. Дана дослідна установка пройшла необхідну метрологічну атестацію.



1 – корпус; 2 – опори; 3 –зразок; 4 – верхній захват; 5 – нижній захват;
6, 8 – шарніри; 7 – динамометр; 9 – гайка; 10 – гвинт; 11 – втулка напрямна;
12 – редуктор; 13 – двигун електричний; 14 – самописець; 15 – диск з отворами; 16 – пристрій для освітлення; 17 – пластина зі щілиною; 18 – фотодіод; 19 – термічна камера; 20 – блок керування; 21 – нагрівальний елемент;
22 – вентилятор; 23 – датчик температури.
Рис. 1. Схема експериментального пристрою для випробування на розтяг полімерних матеріалів

Пристрій для випробування створений на базі РМ-30 і складається з механізму для розтягу зразка зі заданою сталою швидкістю, системи контролю та підтримки певної температури в камері із полімерним зразком та системи автоматичної реєстрації вимірюваних даних, а саме навантаження і відповідної деформації. Основні технічні характеристики пристрою наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Технічні характеристики пристрою для дослідження на розтяг полімерних матеріалів

Технічна характеристика	Технічні дані
Граничне навантаження, Н	500
Гранична похибка вимірювання навантажень, %	1
Максимальне значення шкали для вимірювання деформації, мм	300
Ціна поділки шкали для вимірювання деформації, мм	0,01
Похибка фіксації зусиль, %	1
Гранична похибка переміщення активного захвату, %	0,5
Діапазон швидкостей активного захвату, мм/хв	10...200
Максимальна відстань між захватами, мм	250
Максимальна ширина зразків для випробування, мм	25
Діапазон температур, °С	20...200
Ціна поділки шкали температур, °С	1
Гранична похибка відхилення від заданої температури, °С	1
Габаритні розміри пристрою (Д × Ш × В), мм	1100×850×1970
Вага пристрою, кг	85

За допомогою спеціальних опор 2, які можна налаштовувати, точно за горизонтальністю виставляємо корпус 1. Після горизонтування корпусу 1 фіксуємо полімерний зразок 3 у нерухомому верхньому 4 і рухомому нижньому 5 захватах. Механізми захватів 4 та 5, а також чистота обробки їхніх поверхонь і точність виготовлених та встановлених на даних захватах деталей, дають можливість створювати таку силу тертя, при якій забезпечується фіксація навіть дуже тонких полімерних зразків – 0,005…6 мм.

Нерухомий захват 4 за допомогою шарніру 6 з'єднаний з динамометром 7. Динамометр 7 є мембранним і, в свою чергу, за допомогою шарніру 8 приєднується до рами пристрою РМ-30. Основна функція шарнірів 6 та 8 – це точне центрування полімерних зразків. Шарніри призначені для запобігання прикладення будь-якого навантаження поза центром зразка 3.

Рухомий захват 5 встановлений на телескопічний шток. Внизу даного штоку закріплена гайка 9. Шток рухається строго у вертикальному напрямку в направляючій втулці 11. Це переміщення шток отримує від обертання гвинта 10, яке гвинт отримує від електродвигуна 13 редуктор 12.

За допомогою тиристорного приводу (на рисунку не показаний), який здійснює керування електродвигуном 13, можна змінювати швидкості деформації полімерного зразка в межах від 20 до 250 мм/хв.

За допомогою самописця 14 здійснюється реєстрація значень вимірювання деформації та навантаження і як результат – крива деформації полімерного зразку в системі координат навантаження-розтяг.

Основною метою даних експериментальних досліджень є перевірка результатів, отриманих на основі розроблених в розділі 2 математичних моделей руйнування структури полімерного матеріалу на орієнтовані конгломерати витягнутих сферолітів. Тому, більшу цінність представляють вимірювання навантажень, що приводять до руйнування полімерних зразків в поперечному до попереднього витягування напрямку.

На першому етапі експериментальних досліджень на даному вимірювальному пристрої розтягуємо полімерний зразок перед тим нагрівши його до певної температури.

На другому етапі випробувань знімаємо розтягнутий полімерний зразок, повертаємо його на 90^0 за годинниковою стрілкою і знову закріплюємо його в захватах 4 та 5. Після фіксації зразка розтягуємо його при певній температурі до тих пір, поки він не зруйнується. В момент руйнування самописець 14 зареєструє значення навантаження, при якому зразок був зруйнований. Визначивши площу перерізу в місці розриву зразка, знаючи величину навантаження, що привело до розриву зразка, можна визначити напруження, при яких зв'язки між орієнтованими конгломератами сферолітів (прохідні фібрили) розірвалися.

Навантаження, що діє на полімерний зв'язок під час його деформації, вимірюється динамометром 7. За допомогою тензорезисторів (на рисунку не показані), що розміщені на динамометрі 7, отримаємо сигнал з частотою, що прямо пропорційна навантаженню. Цей сигнал далі йде на пристрій, що вимірює частоту сигналу, після якого інформація про величину напруження поступає на самописець 14, де реєструється.

Деформація полімерного зразку, що відбувається під дією визначеного навантаження та при певній температурі, вимірюється за допомогою оптично-механічного механізму. В диску 15, який закріплений на гвинті 10, по колу зроблено 100 отворів діаметром 1 мм, через які імпульси світла від пристрою освітлення 16 скрізь щілину в пластині 17 попадає на фотодіод 18.

В пластині 17 виконані дві щілини. Відстань між цими щілинами становить половину відстані між отворами, що просвердлені у диску 15. За одне обертання диску 15 і, відповідно, гвинта 10 на фотодіод 18 попадає 200 світлових імпульсів. Так як крок гвинта 10 становить 2 мм, то переміщення гайки 9 і, відповідно, нижнього захвату 5 на 0,01 мм відповідає одному світловому імпульсу, що потрапляє на фотодіод 18.

З фотодіоду 18 електричні імпульси через систему електронних блоків перетворення поступають на самописець, де реєструються, тобто будується крива деформації залежно від прикладеного до зразка навантаження. Точність вимірювання і реєстрації кривої навантаження-деформація становить: для навантаження – 1 %, а для деформації – 0,5 % від максимального значення, відповідно, навантаження і деформації при даному масштабі системи реєстрації кривої.

Для дослідження впливу температури полімерного матеріалу на його міцність використовується термічна камера 19. Контроль і підтримка заданої температури в термічній камері здійснюється регулюючою системою, до складу якої входить блок керування 20, нагрівальний елемент 21, вентилятор 22 і датчик температури 23.

Отже, дана вимірювальна установки дозволяє змінювати в широких межах навантаження розтягу і температуру нагрівання полімерного зразка, що дає можливість дослідити вплив ступеня попередньої витяжки та температури полімерного матеріалу на фізико-механічні властивості в поперечному до попереднього витягування напрямку.

Планування експериментальних досліджень

З метою вибору досліджуваних параметрів, основних факторів та схеми планування експерименту був проведений аналіз апріорної інформації [4]. На основі цього аналізу, як досліджуваний параметр, була вибрана міцність на розрив σ_p полімерного зразка в поперечному до попередньої витяжки напрямку.

Вибір цього параметра пояснюється тим, що руйнуючі полімерні відходи навантаження, які прикладені в поперечному до орієнтованої структури полімерного матеріалу, є значно меншими за навантаження, що прикладені до неорієнтованого полімеру. Визначення оптимальних навантажень попереднього витягування і наступного поперечного до нього розтягу дозволить проектувати пристрої для переробки полімерних відходів, що витрачають мінімум енергії на процес руйнування полімеру.

За основні фактори, які будемо варіювати, обрані такі: X_1 – ступень попередньої витяжки λ; X_2 – температура нагрівання полімерного зразка, T, ^0C.

Тепер необхідно вибрати діапазон варіювання основних факторів: ступеня витяжки та температури. Вибір цього діапазону здійснювався на основі даних, отриманих з попередніх експериментальних досліджень та з аналізу апріорної інформації. Полімерні матеріали, з яких виготовлені зразки для випробування, та характеристика їх властивостей наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Основні характеристики полімерів, з яких виготовлені зразки [4]

Полімер / Властивість	ПЕВП, 20108-075	ПП, 1365 S	ПВХ, ОПЛП-2
1. Коефіцієнт температурного розширення, /K	$13\cdot10^{-5}$	$10\cdot10^{-5}$	$7\cdot10^{-5}$
2. Щільність, г/см^3	0,95	0,90	1,35
3. Відносне подовження при розриві, %	500	400	105
4. Температура склування, ^{0}C	–60	-8	80
5. Температура плавлення, ^{0}C	138	160	180
6. Границя міцності при розтягу, МПа	25	35	6,5
7. Модуль пружності при розтягу, МПа	720	1050	4000

Вихідна довжина і товщина всіх полімерних зразків є однаковими і становлять, відповідно, 85 мм і 3 мм. Ступень витяжки λ зразків з поліетилену та поліпропілену варіювали в межах від 1 до 4, а зразків з полівінілхлориду – від 1 до 2,2. Температуру нагрівання T зразків з поліетилену та поліпропілену варіювали в межах від $20\,^0$C до $100\,^0$C, а з полівінілхлориду – від $80\,^0$C до $140\,^0$C.

Дослідження багатофакторного процесу (факторів ≥ 2) вимагає проведення великої кількості дослідів. Тому доводиться вирішувати задачу планування експерименту, що полягає у встановленні мінімально необхідного числа дослідів. Планування експериментів значно знижує число дослідів, необхідних для одержання моделі розглянутого процесу [6].

Для проведення експериментальних досліджень лінійного наближення не достатньо для математичного опису з необхідною точністю впливу ступеня витяжки та температури на міцність полімерного зразка в поперечному до витяжки напрямку, тому виникає необхідність в побудові моделі в вигляді полінома другого ступеня. При описанні моделі рівнянням другого порядку не можна обмежуватися варіюванням факторів тільки на двох рівнях, так як це не дозволяє отримати потрібну точність експериментального дослідження. У зв'язку з цим будемо планувати експериментальне дослідження, варіюючи фактори на трьох рівнях, а для цього найбільш ефективним є ротатабельний план другого порядку або по іншому план Бокса.

Тому, експериментального дослідження впливу ступеня витяжки та температури на міцність полімерного зразка в поперечному до витяжки напрямку будувалися за факторним планом другого порядку Бокса.

Для отримання точної моделі (параметра оптимізації) використовувався алгебраїчний поліном другого порядку [6]:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2, \quad (1)$$

де $b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{11}, b_{22}$ – коефіцієнти регресії; x_1, x_2 – змінні фактори, відповідно, ступень витяжки λ та температура полімерного зразка T.

Для запису умов експерименту і обробки експериментальних даних рівні факторів кодувались.

Прийняті такі змінні фактори: ступень витяжки X_1, та температура X_2, полімерного матеріалу.

При кодуванні значень X_1, X_2 верхній рівень позначають +1, нижній -1, а нульовий 0. Кодування фактора X_i визначається виразом [6]:

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\varepsilon_i}, \quad (2)$$

де i – номер фактора; X_i – натуральне значення *i-го* фактора; X_{0i} – натуральне значення нульового рівня *i-го* фактора; ε_i – інтервал зміни *i-го* фактора.

Експериментальні дослідження міцності на розрив полімерного зразка при різних значеннях ступеня його витяжки та температури проводились на рівнях варіювання та з інтервалами, які наведені в табл. 3.

Визначення необхідного числа вимірів, що нейтралізує можливі випадкові помилки при відомій надійній ймовірності, здійснювалося відповідно до [6]. Причому загальна величина помилки вимірів не

повинна перевищувати 5%. У результаті було встановлено, що в кожному досліді необхідно проводити чотири паралельних виміри.

Таблиця 3

Рівні та інтервали зміни факторів

Позн.	Фактори	Рівні варіювання					Інтервал варіювання
		– 1,414	– 1	0	+ 1	+ 1,414	
Для зразків з поліпропілену та поліетилену							
X1	Витяжка	1	1,5	2,5	3,5	4	1
X2	Температура, ^{0}C	28	40	70	100	112	30
Для зразків з полівінілхлориду							
X1	Витяжка	1	1,2	1,6	2,0	2,2	0,4
X2	Температура, ^{0}C	80	90	110	130	140	20

В результаті обробки експериментальних результатів були визначені коефіцієнти рівняння регресії (1). Розраховані значення коефіцієнтів регресії наведені у табл. 4.

Таблиця 4

Значення коефіцієнтів рівняння регресії

Матеріал / Коефіцієнт	Зразок з поліпропілену	Зразок з поліетилену	Зразок з полівінілхлориду
b_0	18,16	12,95	5,64
b_1	-4,53	-3,23	-0,28
b_2	-3,79	-2,66	-0,33
b_{12}	1,94	0,63	-0,03
b_{11}	-0,62	-0,18	-0,24
b_{22}	1,14	0,83	0,04

Підставляючи значення коефіцієнтів у (1), отримаємо рівняння регресії:

Для зразка, виготовленого з поліпропілену:

$$y_{\text{пп}}(x_1, x_2) = 18{,}16 - 4{,}53 \cdot x_1 - 3{,}79 \cdot x_2 + 1{,}94 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0{,}62 \cdot x_1^2 + 0{,}14 \cdot x_2^2. \quad (3)$$

Для зразка, виготовленого з поліетилену:

$$y_{\text{пе}}(x_1, x_2) = 12{,}95 - 3{,}23 \cdot x_1 - 2{,}66 \cdot x_2 + 0{,}63 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0{,}18 \cdot x_1^2 + 0{,}83 \cdot x_2^2. \quad (4)$$

Для зразка, виготовленого з полівінілхлориду:

$$y_{\text{пвх}}(x_1, x_2) = 5{,}64 - 0{,}28 \cdot x_1 - 0{,}33 \cdot x_2 - 0{,}03 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0{,}24 \cdot x_1^2 + 0{,}04 \cdot x_2^2. \quad (5)$$

В результаті проведених перевірок на значущість коефіцієнтів згідно до [92] було встановлено, що всі коефіцієнти є статично значимі, і тому рівняння регресії (3)-(5) не спрощуються.

Адекватність отриманого рівняння регресії реальним процесом перевірялася за допомогою критерію Фішера. Порівнюючи знайдений критерій Фішера з табличним (2,15 < 9,10 – при випробуванні поліпропіленових зразків; 5,65 < 9,10 – при випробуванні поліетиленових зразків та 7,5 < 9,10 – при випробуванні зразків з полівінілхлориду), при вибраній надійній ймовірності, можна стверджувати, що рівняння регресії (3)-(5) є адекватними з 95-відсотковою надійною ймовірністю [6].

Для одержання натуральних рівнянь підставимо значення кодованого фактора X, згідно з виразом (2), у рівняння (3)-(5) і одержимо функції залежності міцності зразків з поліпропілену, поліетилену та полівінілхлориду в поперечному до витягування напрямку від температури T і ступеня витяжки λ.

Функції залежності міцності зразків з поліпропілену:

$$\sigma_{12}^{\text{пп}} = 18{,}16 - 4{,}39 \cdot (\lambda - 2{,}5) - 3{,}76 \cdot \frac{T - 70}{30} + 1{,}88 \cdot (\lambda - 2{,}5) \cdot \frac{T - 70}{30} - \\ - 0{,}75 \cdot (\lambda - 2{,}5)^2 + 1{,}14 \cdot \left(\frac{T - 70}{30}\right)^2. \quad (6)$$

Функції залежності міцності зразків з поліетилену:

$$\sigma_{12}^{\text{пе}} = 12{,}95 - 3{,}23\cdot(\lambda - 2{,}5) - 2{,}66\cdot\frac{T-70}{30} + 0{,}63\cdot(\lambda-2{,}5)\cdot\frac{T-70}{30} - \\ - 0{,}18\cdot(\lambda-2{,}5)^2 + 0{,}83\cdot\left(\frac{T-70}{30}\right)^2. \quad (7)$$

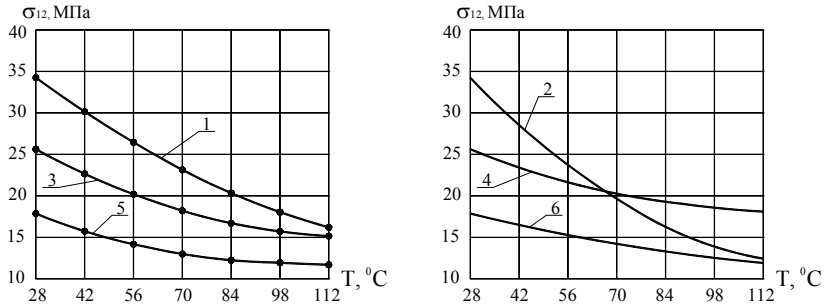
Функції залежності міцності зразків з полівінілхлориду:

$$\sigma_{12}^{\text{пвх}} = 5{,}64 - 0{,}28\cdot\frac{\lambda-1{,}6}{0{,}4} - 0{,}33\cdot\frac{T-110}{20} - 0{,}03\cdot\frac{\lambda-1{,}6}{0{,}4}\cdot\frac{T-110}{20} - \\ - 0{,}24\cdot\left(\frac{\lambda-1{,}6}{0{,}4}\right)^2 + 0{,}04\cdot\left(\frac{T-110}{20}\right)^2. \quad (8)$$

Отримані рівняння дозволяють описати процес руйнування орієнтованої структури полімерного матеріалу в поперечному до цієї орієнтації напрямку залежно від ступеня витяжки та температури матеріалу. Дані залежності можна використовувати при розрахунках технологічних та конструкційних параметрів обладнання для переробки полімерних відходів легкої промисловості.

Аналіз результатів експериментальних досліджень

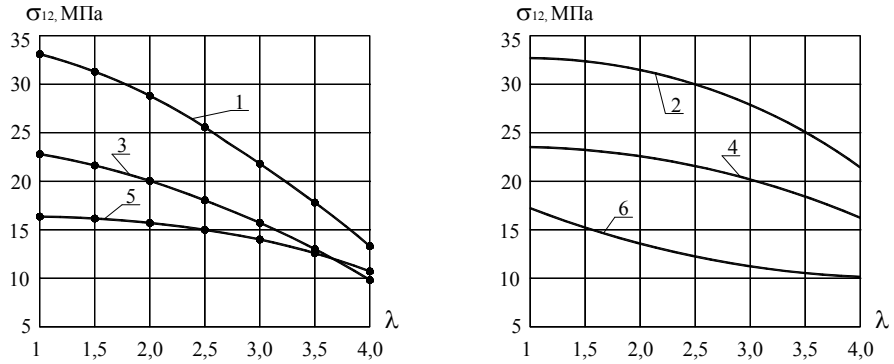
На рис. 2-7 зображені графіки залежності міцності полімерних матеріалів (поліпропілену, поліетилену і полівінілхлориду) поперек орієнтації їх структуру від ступеня попередньої витяжки λ та температури T. Наведені на рисунках функціональні залежності представляють результати аналітичних досліджень зміни структури полімеру сферолітної будови під впливом навантажень і температури та результати апроксимації експериментально отриманих даних.



а б

1, 2 – ступінь витяжки $\lambda = 1$; 3, 4 – ступінь витяжки $\lambda = 2{,}5$; 5, 6 – ступінь витяжки $\lambda = 4{,}0$

Рис. 2. Залежності міцності на розрив поперек орієнтації структури поліпропіленового зразка від температури: а – апроксимація експериментальних даних; б – аналітичні залежності



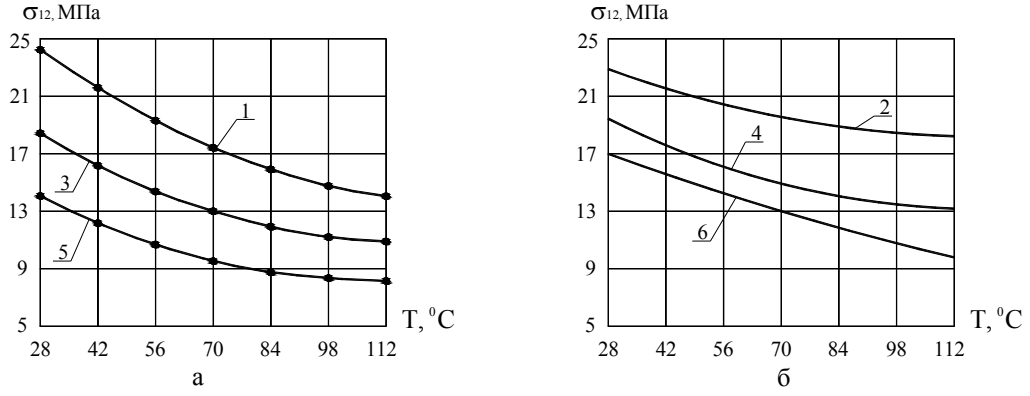
а б

1, 2 – температура $T = 28\ ^0\text{C}$; 3, 4 – температура $T = 70\ ^0\text{C}$; 5, 6 – температура $T = 112\ ^0\text{C}$

Рис. 3. Залежності міцності на розрив поперек орієнтації структури поліпропіленового зразка від ступеня витяжки: а – апроксимація експериментальних даних; б – аналітичні залежності

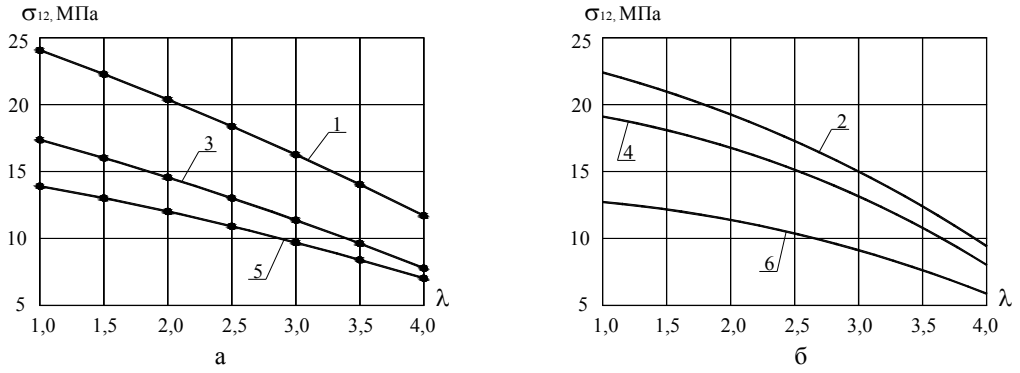
З представлених графіків видно, що розроблені в роботах [1-3] аналітичні вирази, що моделюють процес руйнування полімерного матеріалу та отримані регресійні залежності міцності поліпропілену поперек орієнтації його структури від ступеня витяжки та температури задовільно узгоджуються (відносне відхилення експериментальних значень від теоретичних не перевищує 14%). Цей факт підтверджує правомірність використання математичної моделі для дослідження зміни структури полімерних матеріалів сферолітної будови під дією напружень розтягу та стиску.

Аналогічний аналіз результатів експериментальних досліджень впливу ступеня витяжки та температури на міцність полімеру проводився для поліетилену (рис. 4-5) і полівінілхлориду (рис. 6-7).



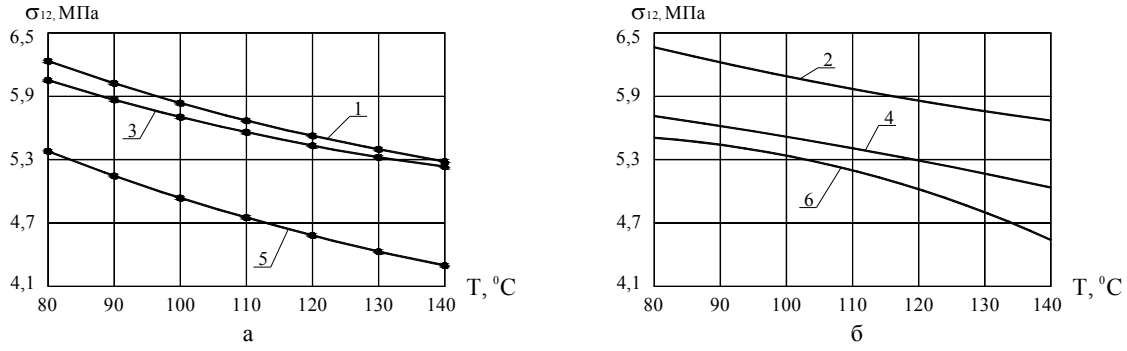
1, 2 – ступінь витяжки $\lambda = 1$; 3, 4 – ступінь витяжки $\lambda = 2{,}5$; 5, 6 – ступінь витяжки $\lambda = 4{,}0$

Рис. 4. Залежності міцності на розрив поперек орієнтації структури поліетиленового зразка від температури: а – апроксимація експериментальних даних; б – аналітичні залежності



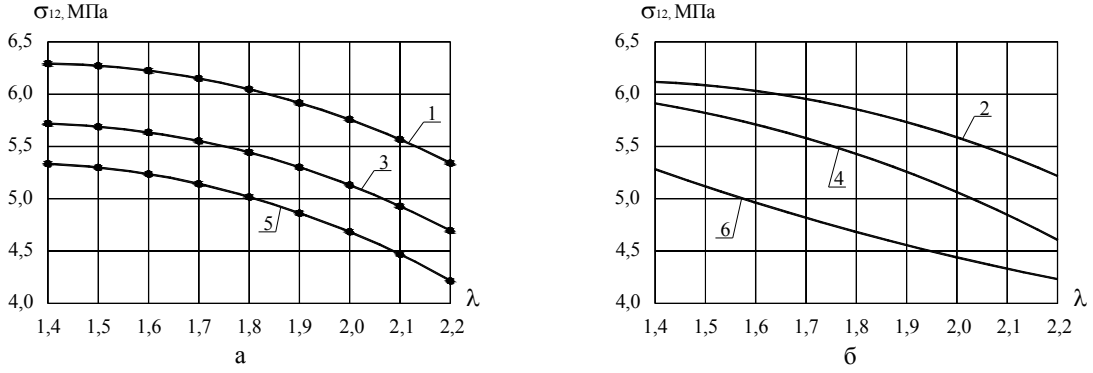
1, 2 – температура $T = 28\ ^0\text{C}$; 3, 4 – температура $T = 70\ ^0\text{C}$; 5, 6 – температура нагрівання $T = 112\ ^0\text{C}$

Рис. 5. Залежності міцності на розрив поперек орієнтації структури поліетиленового зразка від ступеня витяжки: а – апроксимація експериментальних даних; б – аналітичні залежності



1, 2 – ступінь витяжки $\lambda = 1$; 3, 4 – ступінь витяжки $\lambda = 1{,}6$; 5, 6 – ступінь витяжки $\lambda = 2{,}2$

Рис. 6. Залежності міцності на розрив поперек орієнтації структури зразка, виготовленого з полівінілхлориду, від температури: а – апроксимація експериментальних даних; б – аналітичні залежності



1, 2 – температура $T = 80\ ^0\text{C}$; 3, 4 – температура $T = 110\ ^0\text{C}$; 5, 6 – температура $T = 140\ ^0\text{C}$

Рис. 7. Залежності міцності на розрив поперек орієнтації структури зразка, виготовленого з полівінілхлориду, від ступеня витяжки: а – апроксимація експериментальних даних; б – аналітичні залежності

З представлених графіків (рис. 4–7) видно, що розроблена в [1–3] математична модель зміни структури полімерного матеріалу під впливом напружень розтягу і стиску та отримані регресійні залежності міцності поліетилену і полівінілхлориду поперек орієнтації його структури від ступеня витяжки та температури задовільно узгоджуються (відносне відхилення експериментальних значень від теоретичних не перевищує 16%). Цей факт підтверджує правомірність використання математичної моделі для дослідження впливу напружень на зміну структури полімерних матеріалів сферолітної будови.

Висновки

Результати, проведені експериментальні дослідження можуть бути використанні для визначення пружних характеристик полімерних матеріалів.

На підставі детального аналізу існуючих методів і держстандартів було розроблено та застосовано метод, який дозволив визначити у широкому температурному діапазоні (20...200 0С) міцність полімерних матеріалів. Наведено принципи роботи пристрою і описані методи визначення в'язкопружних властивостей, які необхідні для визначення технологічних та конструкційних параметрів переробки полімерних відходів легкої промисловості.

Література

1. Синюк О. М. Модель будови недеформованих полімерів сферолітної структури / О.М. Синюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2016. – № 3 (237). – С. 181–188.

2 Синюк О. М. Метод розрахунку ефективних пружних властивостей полімерів з орієнтованою структурою / О. М. Синюк // Технічні науки і технології: науковий журнал Чернігівського національного технологічного університету. – 2016. – № 4. – С. 16–25.

3. Синюк О.М. Визначення пружних властивостей аморфно-кристалічних полімерів сферолітної структури / О.М. Синюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 6. – С. 77–86.

4. Мантия Ф. Ла. Вторичная переработка пластмасс / Ф. Ла Мантия ; пер. с англ. / под. ред. Г.Е. Зайкова. – СПб : Профессия, 2006. – 400 с.

5. Кострицкий В.В. Испытательная машина для определения качественных показателей пленочных полимерных, композиционных и текстильных материалов / В.В. Кострицкий, М.П. Березненко, Г.А. Ванин, В.В. Корзун // Заводская лаборатория. – 1994. – № 12. – С. 124–128.

6. Тихомиров В. Б. Планирование и анализ эксперимента / В. Б. Тихомиров – М. : Легкая индустрия, 1974. – 263 с.

References

1. Synyuk O.M. (2016). Model budovy nedeformovanykh polimeriv sferolitnoi struktury [The structural model of undeformed polymers of spheruline structure]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu – Herald of Khmelnytsky National University*, 3 (237), 181–188 [in Ukrainian].

2. Synyuk O. M. (2016). Metod rozrakhunku efektyvnykh pruzhnykh vlastyvostei polimeriv z oriientovanoiu strukturoiu [The calculation method of effective elastic properties of oriented polymers]. *Tekhnichni nauky i tekhnolohiyi: naukovyy zhurnal Chernihivs'koho natsional'noho tekhnolohichnoho universytetu – Technical sciences and technologies: scientific journal of Chernihiv National Technological University*, 2016, 4, 16–25 [in Ukrainian].

3. Synyuk O.M. (2016). Vyznachennia pruzhnykh vlastyvostei amorfno-krystalichnykh polimeriv sferolitnoi struktury [Determination of elastic properties of amorphous-crystalline polymers of a spheruline structure]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Bulletin of the Vinnitsa Polytechnic Institute,* 6, 77–86 [in Ukrainian].

4. Mantiya, F. La. (2006). *Vtorichnaya pererabotka plastmass* [Secondary recycling of plastics]. G.E. Zaykova (Ed.). St. Petersburg : Professiya [in Russian].

5. Kostritskiy V.V. (1994). Ispytatelnaya mashina dlya opredeleniya kachestvennykh pokazateley plenochnykh polimernykh kompozitsionnykh i tekstilnykh materialov [Testing machine for determining the qualitative characteristics of film polymer, composite and textile materials]. *Zavodskaya laboratoriya – Factory laboratory*, 12, 124–128 [in Russian].

6. Tikhomirov V. B. (1974). Planirovaniye i analiz eksperimenta [Planning and analysis of the experiment], Moscow : Legkaya industriya, 263 [in Russian].

Рецензія/Peer review : 0911.2017 р. Надрукована/Printed :07.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Скиба М.Є.

УДК 678.023.5

М.Є. СКИБА, О.М. СИНЮК
Хмельницький національний університет

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Розраховане і спроектоване обладнання для переробки полімерних відходів легкої промисловості не вимагає використання дорогих спеціальних пристроїв і може бути використане в будь-якому місці накопичення полімерних відходів. Крім того, механічна переробка полімерних матеріалів дозволяє створювати у відновленому полімері анізотропну структуру, що близька до орієнтованого полімеру, тобто фрагменти зруйнованого полімерного матеріалу в напрямку їх довжини будуть мати підвищені фізико-механічні властивості. Це дозволяє використовувати їх як наповнювачі під час виготовлення нових полімерних виробів легкої промисловості, що дозволить покращити експлуатаційні характеристики тих областей виробів, на які діють значні навантаження в процесі їх повсякденного використання.

Проведені дослідження показали, що найбільш раціональним діапазоном ефективних значень технологічних деформацій, у межах якого спостерігається найістотніше пластичне ослаблення структури полімеру, є інтервал (0,7…0,85) від значення розривної деформації.

Проведені дослідження зміни міцності відходів полімерних матеріалів від колової швидкості валків у інтервалі найбільш раціональних технологічних деформацій стиску $\hat{\varepsilon}_2/\varepsilon$ показали, що для поліетилену, поліпропілену та поліетилентерефталату в інтервалі швидкостей v = (0,025…0,1) м/с впливом колової швидкості валків на зміну міцності полімерів можна знехтувати. У той же час, збільшення швидкості валків призводить до зростання продуктивності процесу переробки з одночасним збільшенням навантажень на валкове обладнання, а також енергоспоживання. Найбільш раціональне рішення про вибір колової швидкості варто шукати, виходячи з компромісного розв'язання проблеми вибору між продуктивністю й енергоспоживанням.

Ключові слова: експеримент, установка, параметри, полімер, структура, напруження, деформація.

SKYBA MYKOLA, SYNYUK OLEG
Khmelnytskyi National University

EXPERIMENTAL RESEARCHES ON THE PROCESS OF PROCESSING OF POLYMERIC WASTE OF LIGHT INDUSTRY

The calculated and designed equipment for processing plastic waste light industry does not require expensive special equipment and can be used in any place of accumulation of plastic waste. In addition, the mechanical processing of polymeric materials can create in the restored anisotropic polymer structure that is close to the oriented polymer, ie fragments of destroyed polymer material in the direction of their length will be increased physical and mechanical properties. This allows their use as fillers are made with new polymer light industry that will improve the performance of the areas of products, which are heavy loads in their daily use.

Researches have shown that the most rational range of effective technological strain values $\hat{\varepsilon}_2/\varepsilon$ within which there is the most significant weakening of the plastic polymer structure is interval (0.7 ... 0.85) on the value of the bursting strain.

Researches have changes in strength waste polymeric materials of the angular velocity of the rolls in the most efficient range compression deformation process showed that polyethylene, polypropylene and polyethylene terephthalate in the range of velocity v = (0,025 ... 0,1) m/s, the influence of the angular velocity rolls on the change in the strength of polymers can be neglected. At the same time, increasing the speed of rolls leads to an increase in the productivity of the processing process with the simultaneous increase in the load on roller equipment, as well as energy consumption. The most rational solution for choosing speed is to look for a compromise solution to the problem of choice between productivity and power consumption.

Keywords: *experiment, installation, parameters, polymer, structure, stress, deformation.*

Вступ

Програма експериментальних досліджень основних конструкційних та технологічних параметрів переробки полімерних відходів мала на меті виявити їх вплив на структурну буду полімеру, що дозволило б визначати характеристики і тип напружено-деформованого стану, збуджуваного перероблюючим обладнанням у полімерному матеріалі.

На першому етапі на підставі отриманих у [1] залежностей для переблюючого обладнання визначалися найбільш раціональні конструктивні і технологічні параметри, які забезпечують формування у матеріалі, що перероблюється, заданого напружено-деформованого стану.

На третьому етапі зразки полімерних матеріалів піддавалися безпосередній обробці на експериментальному технологічному обладнанні, після чого визначався ступінь ослаблення структури полімеру залежно від параметрів обладнання і процесу переробки (деформацій розтягу, стиску, зсуву, швидкості протягування, подачі, кількості циклів обробки та ін.). Як показник ступеня ослаблення структури полімеру використовувалися такі загальноприйняті показники [2–5], як значення динамічного модуля пружності і границя міцності.

Оцінка застосовності основних положень теорії механічної переробки полімерних матеріалів [6–8] проведена на прикладі найбільш розповсюдженого валкового обладнання, яке широко використовується у технологічних процесах переробки полімеру і є найпродуктивнішим, найдешевшим і найпростішим в експлуатації на малих і великих підприємствах.

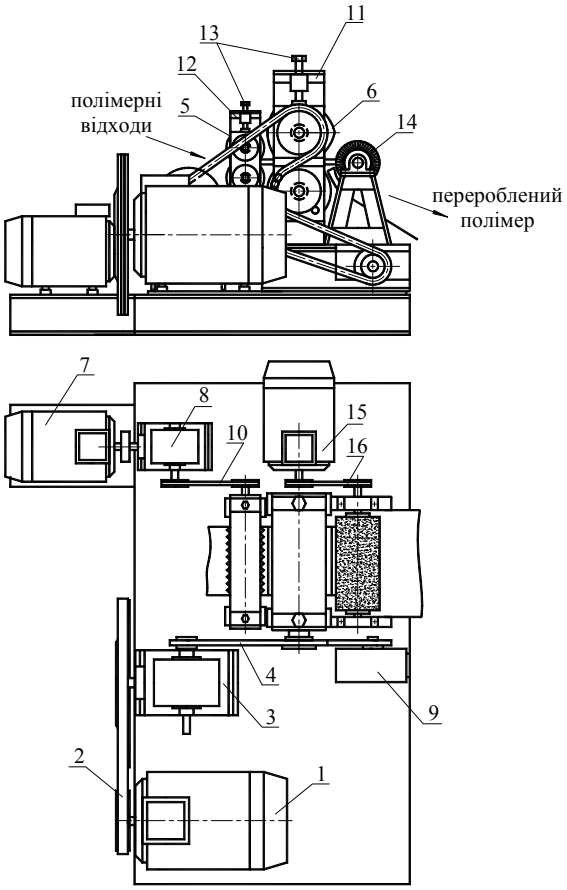
Принцип роботи пристрою.

На підставі отриманих в [1] залежностей було спроектовано й визначено найбільш раціональні конструктивні та технологічні параметри валкового пристрою, за допомогою якого проводились експериментальні дослідження технологічного процесу переробки полімерних відходів легкої промисловості.

В основу роботи пристрою покладена можливість фізичного моделювання процесів, що протікають при змінні структури полімерів на валках, а також можливість варіювання деяких технологічних і конструктивних параметрів.

На основі цих залежностей були визначені найбільш раціональні конструктивні та технологічні параметри валкових пристроїв та спроектоване обладнання для переробки полімерних відходів легкої промисловості (рис. 1).

На рис. 1 представлений загальний вид пристрою для переробки полімерних відходів. Він складається з електродвигуна 1 (потужність $N = 1{,}5$ кВт, частота обертання вала двигуна $n = 3000$ об/хв), пасової передачі 2, шківи якої виконані з можливістю зміни швидкості обертання, черв'ячного редуктора 3 (передаточне число $u = 34$), ланцюгової передачі 4 (ПР-12,7-1800-1, крок 12,7 мм, навантаження 18000 Н), натяжного пристрою 9, пристрою з зубчастими валками 5, пристрою з валками типу Рело 6 (обертаються в поперечному до обертання зубчастих валків напрямку).



1, 7, 15 – електродвигун; 2 – пасова передача; 3, 8 – редуктор черв'ячний; 4, 10, 16 – ланцюгова передача; 5 – зубчастий валковий пристрій; 6 – пристрій валковий з профілем Рело; 9 – натяжний пристрій; 11, 12 – стійки; 13 – упорні болти; 14 – голкофреза

Рис. 1. Пристрій для переробки відходів полімеру

Для руйнування структури полімерного матеріалу використовувався пристрій із зубчастими валками та пристрій з валками профілю Рело. Зубчасті валки отримують обертання від електродвигуна 7 через черв'ячну 8 і ланцюгову 10 передачі, а валки профілю Рело отримають обертання через пасову передачу 2, редуктор (черв'ячний) 3 та ланцюгову передачу 3.

Ланцюги передач 3 та 10 обходять зірочки верхнього і нижнього валків обох пристроїв з різних боків, тому валки пристроїв 5 і 6 обертаються в протилежних напрямках, що забезпечує затягування полімерного матеріалу у між валковий простір.

Кожен із зубчастих валків має 10 впадин і 10 зубців (рис. 2), які зчіплюються між собою.

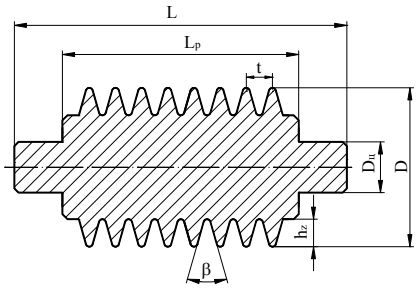


Рис. 2. Схема для визначення конструкційних параметрів зубчастого валка

Параметри зубчастих валків розраховувалися згідно до методу, наведеному в [1]. Крок та кут профілю зубців визначався з виразу [1]. Максимальний коефіцієнт тертя між поліетиленом, поліпропіленом і полівінілхлоридом та поверхнею зубців приймемо рівним $f = 0{,}8$; товщину полімерного матеріалу приймемо 1, 3, 5, 8 мм, а відносну деформацію ε_1, при якій структура полімеру зміниться, тобто відбудеться пластичне ослаблення матеріалу поперек його розтягу, приймемо рівною 0,6; 0,8 і 0,9.

Підставивши наведені вище дані в рівняння, отримаємо значення кута профілю зубців: $\beta = 77^0$, 68^0 та 64^0. З урахуванням того, що збільшення кута профілю зубців приводить до зменшення енергетичних витрат, та для забезпечення великих деформацій полімерного матеріалу приймемо $\beta = 70^0$.

За відомим кутом профілю зубців за допомогою рівнянь [1] розрахуємо крок зубців при різних параметрах товщини полімерного матеріалу (табл. 1)

У зв'язку з тим, що діапазон товщини полімерних відходів легкої промисловості є досить широким та враховуючи розподіл полімерних відходів за їх товщиною, попередньо приймемо такий крок зубців $t = 12$ мм.

Таблиця 1

Крок зубців валкового пристрою при різній товщині полімеру

Товщина полімеру, мм	1	3	5	8
Крок зубців, мм	2,7	8,2	13,6	21,8

Отже, розрахований крок та кут профілю зубців забезпечують потрібний розтяг полімерного матеріалу, при якому його структура змінюється, а саме відбувається витягування та орієнтація сферолітів та їх конгломератів. В результаті чого відбувається пластичне ослаблення структури полімерного матеріалу в поперечному до витягування напрямку.

Згідно з [1] знайдемо висоту зубців:

$$h_z = \frac{t-\kappa}{2\cdot tg\frac{\beta}{2}} = \frac{12-2{,}5}{2\cdot tg\frac{70}{2}} = 6{,}78 \text{ мм},$$

де κ – ширина площадки заокруглення вершин зубців, яка приймається конструктивно. Для проектних розрахунків ширина площадки заокруглення вершин зубців була прийнята рівною 2,5 мм, а висота зубців – 6,5 мм.

Радіус заокруглення зубців розраховувався з рівняння:

$$r = \frac{h}{2\varepsilon_p}. \quad (1)$$

Розраховані значення радіусу заокруглення зубців наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Значення радіусу закруглення зубців при різній деформації та товщини полімерного матеріалу

h_1, мм	1			3			5			8		
ε_p	0,6	0,8	0,9	0,6	0,8	0,9	0,6	0,8	0,9	0,6	0,8	0,9
r, мм	0,8	0,6	0,6	2,5	1,9	1,7	4,2	3,1	2,8	6,7	5,0	4,4

У зв'язку з тим, що діапазон товщини полімерних відходів легкої промисловості є досить широким та враховуючи розподіл полімерних відходів за їх товщиною, попередньо приймемо такий радіус заокруглення зубців $r = 3$ мм.

Затягування полімерного матеріалу зубчастими валками буде відбуватися, якщо зусилля, що затягує, Q більше за силу відштовхування F_R від поверхні валка, тобто:

$$Q = F_t \cdot \cos\varphi_o \geq F_R = N_R \cdot \sin\varphi_o, \quad (2)$$

де N_R – сила відштовхування полімеру від поверхні валка (або сила реакції валка на тиск полімеру), F_t – сила тертя між полімерним матеріалом і поверхнею зубчастого валка; φ_o – кут охоплення полімером зубчастого валка.

З рівняння (2) отримаємо: $\varphi_o \leq \psi$, де $\psi = \text{arctg}\, f$, f – коефіцієнт тертя.

Використовуючи рівняння з [терн] та проводячи деякі його перетворення, визначимо діаметр зубчатих валків D:

$$D = \frac{h_z + \varepsilon_{cm} h_1}{1-\cos\varphi_o}, \quad (3)$$

де $\varepsilon_{cm} = \frac{h_1 - h_2}{h_1}$ – деформація стиску полімерного матеріалу; h_2 – товщина полімерного матеріалу після його проходження між зубчастими валками.

Якщо в рівнянні (3) замість кута охоплення полімером зубчастого валка φ_o підставити вираз для кута тертя $\text{arctg}\, f$, то отримаємо мінімальний діаметр зубчастих валків, при якому відбувається затягування полімерного матеріалу в між валковий простір:

$$D = \frac{h_z + \varepsilon_{cm} h_1}{1-\cos(\text{arctg}\, f)}. \quad (4)$$

Використовуючи вираз (4) розрахуємо значення діаметрів валків залежно від таких параметрів: коефіцієнта тертя ($f = 0{,}8$), висоти зубців ($h_z = 6{,}5$ мм), деформації стиску ($\varepsilon_{cm} = 0{,}4;\ 0{,}6;\ 0{,}8$) та початкової товщини полімеру ($h_1 = 1,\ 3,\ 5,\ 8$ мм). Результати розрахунку наведені в таблиці 3.

З метою більш надійного затягнення полімеру в міжвалковий простір, а також враховуючи, що полімерний матеріал може бути вологим, приймемо коефіцієнт тертя $f = 0{,}5$. Тоді діаметр зубчастого валка

буде дорівнювати $D = 122$ мм.

Таблиця 3

Значення діаметра зубчатих валків від деформації стиску та початкової товщини полімеру

h_1, мм	1,0			3,0			5,0			8,0		
ε_{cm}	0,4	0,6	0,8	0,4	0,6	0,8	0,4	0,6	0,8	0,4	0,6	0,8
D, мм	48,4	49,8	51,2	54,0	58,2	62,4	59,6	66,5	73,6	68,2	80,0	90,5

За результатами наведених вище розрахунків та для проведення перевірочних і уточнюючих експериментальних досліджень були виготовлені зубчасті валки.

Розрахунок параметрів і проектування пристрою із валками профілю Рело

Кожен із валків профілю Рело має подібну до трикутника форму (рис. 3). Валки обертаються таким чином, що відстань між їхніми осями не змінюється. Базовий радіус R_0 валка профілю Рело приймаємо рівним радіусу зубчастого валка, тобто $R_0 = 61$ мм.

Параметри валків розраховувалися згідно до методу, наведеному в [1]. Радіус дуги R_D визначимо з виразу:

$$R_D = \sqrt{\left(\frac{R_0}{2} + W\right)^2 + \frac{3}{4} \cdot R_0^2}, \qquad (5)$$

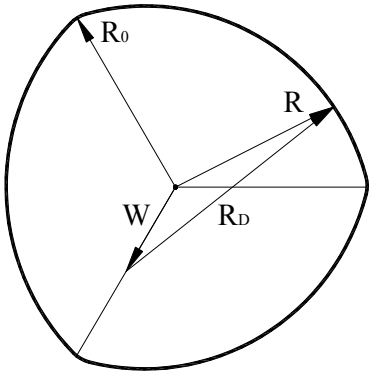


Рис. 3. Схема для визначення конструкційних параметрів валків

а відстань від осі обертання валків профілю Рело до їх поверхонь R визначимо з такого рівняння:

$$R = R_D - W, \qquad (6)$$

де W – ексцентриситет дуги відносно центру обертання валка.

Результати розрахунків конструкційних параметрів валків профілю Рело представлені в таблиці 4.

Таблиця 4

Значення радіусу дуги та відстані від центра обертання до поверхні валка профілю Рело при різних значеннях ексцентриситету

W, мм	5	10	30	50
R_D, мм	63,6	66,5	80,3	96,2
R, мм	58,6	56,5	50,3	46,2

Використовуючи рівняння, отримані в роботі [1], виразимо деформацію зсуву через ексцентриситет:

$$\gamma = \frac{\left[R_0 - \left(\sqrt{\left(\frac{R_0}{2} + W\right)^2 + \frac{3}{4} \cdot R_0^2} - W\right)\right] \cdot \pi}{3h_1}. \qquad (7)$$

Ексцентриситет валків визначався з виразу (7) при різній початковій товщині $h_1 = 0{,}8; 1; 1{,}2; 1{,}5$ та при різних деформаціях зсуву $\gamma = 0{,}4; 0{,}6; 0{,}8$ для поліетиленової та поліпропіленової плівки.

Підставляючи наведені вище значення товщини полімерного матеріалу та його деформацій зсуву в рівняння (7), визначимо ексцентриситет шляхом підбору (табл. 5).

Таблиця 5

Значення ексцентриситету валків при різній деформації та товщині полімерного матеріалу та деформації зсуву

h_1, мм	0,8			1			1,2			1,5		
γ	0,4	0,6	0,8	0,4	0,6	0,8	0,4	0,6	0,8	0,4	0,6	0,8
W, мм	4,5	12,5	20,2	5,7	16,2	27,2	7,0	20,5	35,4	9,0	27,4	51,2

У зв'язку з тим, що діапазон товщини полімерних відходів легкої промисловості є досить широким та враховуючи розподіл полімерних відходів за їх товщиною, для проектних розрахунків приймемо таке

значення ексцентриситету $W = 25$ мм, а радіус дуги, відповідно, – $R_D = 76{,}6$ мм

Отже, розрахований ексцентриситет та радіус дуги для валків профілю Рело забезпечують потрібний зсув полімерного матеріалу в поперечному до попередньої витяжки напрямку, при якому його структура руйнується, а саме відбувається розрив перенапружених зв'язків між орієнтованими конгломератами витягнутих сферолітів. В результаті чого полімерний матеріал подрібнюється на витягнуті фракції з орієнтованою структурою.

Затягування полімерного матеріалу валками профілю Рело буде відбуватися, якщо зусилля, що затягує, більше за силу відштовхування від поверхні валка, тобто:

$$F_t \cdot \cos\varphi_o \geq N_R \cdot \sin\varphi_o, \tag{8}$$

де N_R – сила відштовхування полімеру від поверхні валка (або сила реакції валка на тиск полімеру), F_t – сила тертя між полімерним матеріалом і поверхнею валка профілю Рело; φ_o – кути охоплення полімером валків будуть різни, тому що в момент затягування полімерного матеріалу в міжвалковий простір радіуси валків різні (рис. 3).

Приймаємо в розрахунках такий кут охоплення, при якому сила відштовхування полімеру від поверхні валка більша, тобто $\varphi_o = \varphi_2$.

З рівняння (8) отримаємо: $\varphi_o \leq \psi$, де $\psi = \operatorname{arctg} f$, f – коефіцієнт тертя.

Використовуючи вирази, отримані в [1], та проводячи деякі його перетворення, уточнимо прийняте раніше значення базового діаметра для валків профілю Рело D_0:

$$D_0 = \frac{R_0 - R + \varepsilon_{cm} h_1}{1 - \cos\varphi_o}, \tag{9}$$

де $\varepsilon_{cm} = \dfrac{h_1 - h_2}{h_1}$ – деформація стиску полімерного матеріалу; h_2 – товщина полімерного матеріалу після його проходження між валками профілю Рело.

Якщо в рівнянні (9) замість кута охоплення полімером валка профілю Рело φ_o підставити вираз для кута тертя $\operatorname{arctg} f$, то отримаємо мінімальний базовий діаметр валків профілю Рело, при якому відбувається затягування полімерного матеріалу в міжвалковий простір:

$$D_0 = \frac{R_0 - R + \varepsilon_{cm} h_1}{1 - \cos(\operatorname{arctg} f)}, \tag{10}$$

Використовуючи вираз (10) розрахуємо значення базових діаметрів валків профілю Рело залежно від таких параметрів: коефіцієнт тертя ($f = 0{,}5$), базовий радіус ($R_0 = 61$ мм), ексцентриситет ($W = 25$ мм), деформації стиску ($\varepsilon_{cm} = 0{,}4;\ 0{,}6;\ 0{,}8$) та початкова товщина полімеру ($h_1 = 0{,}8;\ 1{,}0;\ 1{,}2;\ 1{,}5$ мм). Результати розрахунку наведені в таблиці 6.

Таблиця 6

Значення базового діаметру валків від деформації стиску та початкової товщини полімеру

h_1, мм	0,8			1,0			1,2			1,5		
ε_{cm}	0,4	0,6	0,8	0,4	0,6	0,8	0,4	0,6	0,8	0,4	0,6	0,8
D, мм	91,8	93,4	94,8	92,6	94,5	96,4	93,4	95,6	98,0	94,5	97,4	100,2

З метою більш надійного затягнення полімеру в міжвалковий простір, приймемо базовий діаметр валка, виготовленого за профілем Рело, рівним дорівнювати $D = 95$ мм.

За результатами наведених вище розрахунків та для проведення перевірочних і уточнюючих експериментальних досліджень були виготовлені валки профілю Рело.

Результати експериментальних досліджень.

За допомогою спроектованої і виготовленої експериментальної установки для переробки полімерних відходів були отримані зразки для випробувань на міцність в залежності від конструкційних та технологічних параметрів пристрою.

На рис. 4–6 зміна міцності при розтягу вздовж напрямку попередньої орієнтації полімерного матеріалу, що пройшов одноразову обробку у валковому пристрої, від рівня ефективної технологічної деформації.

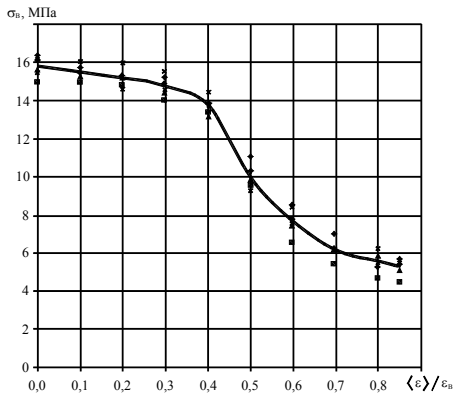


Рис.4. Зміна міцності при розтягу вздовж напрямку попередньої орієнтації поліетилену, що пройшов одноразову обробку у валковому пристрої, від рівня ефективної технологічної деформації при коловій швидкості валків V=0,025 м/с

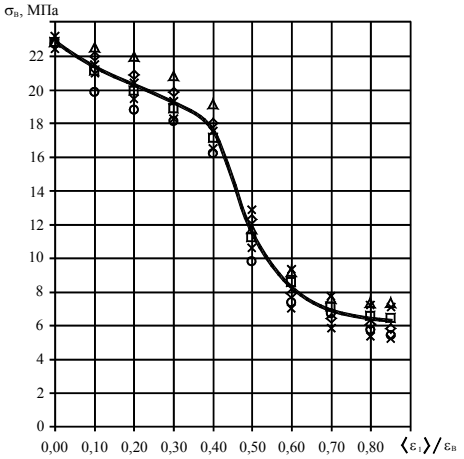


Рис. 5. Зміна міцності при розтягу вздовж напрямку попередньої орієнтації поліпропілену, що пройшов одноразову обробку у валковому пристрої, від рівня ефективної технологічної деформації при коловій швидкості валків V=0,025 м/с

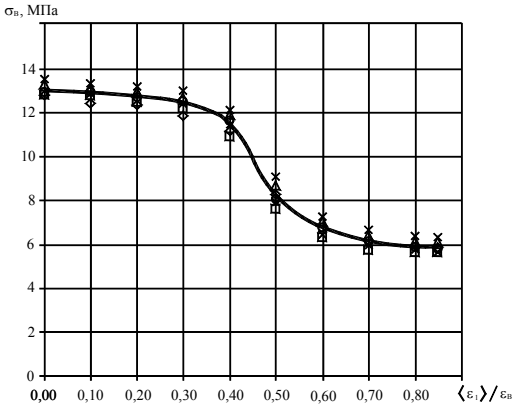


Рис. 6. Зміна міцності при розтягу вздовж напрямку попередньої орієнтації поліетилентерефталату, що пройшов одноразову обробку у валковому пристрої, від рівня ефективної технологічної деформації при коловій швидкості валків V=0,025 м/с

Висновки

Аналіз результатів, представлених на рис. 4–6 показує, що крива зміни міцності характеризує її втрату для всіх досліджених зразків. При цьому на кривій можна виділити три явно помітних ділянки.

Перша, початкова ділянка довжиною (0…0,4) одиниць відносної деформації ($\hat{\varepsilon}_2/\varepsilon$) характеризується незначною втратою міцності полімеру відносно початкового стану, у середньому на 15% для поліетилену (ПЕ), на 30% для поліпропілену (ПП) і на 13% для поліетилентерефталату (ПЕТ).

Відсутність великих, візуально помітних, залишкових деформацій на поверхні полімеру дозволяє рекомендувати цей діапазон як найбільш раціональний при одержанні спеціальних демпферних виробів з попередньо ослаблених полімерних матеріалів.

Друга, проміжна ділянка кривої втрати міцності, довжиною (0,4…0,6) одиниць відносної деформації ($\hat{\varepsilon}_2/\varepsilon$) характеризується інтенсифікацією процесу ослаблення структури всіх досліджених полімерів.

Так, пройшовши обробку в дослідженому діапазоні відносних деформацій ($\hat{\varepsilon}_2/\varepsilon$), поліетилен втратить міцність більше, ніж у 2,1 разу порівняно з вихідною міцністю; поліпропілен втратить свою міцність більше, ніж у 2,8 разу і ПЕТФ втратить свою міцність більше, ніж у 1,9 разу.

Після обробки полімерних матеріалів у зазначеному діапазоні на їх поверхні з'являються чітко помітні заломи і сліди прокатки у валках.

Третя, заключна ділянка кривої втрати міцності, довжиною (0,6…0,85) одиниць відносної деформації ($\hat{\varepsilon}_2/\varepsilon$), характеризується початком процесу руйнування структури полімерного матеріалу.

Порівняно з вихідною міцністю, обробка полімерів у зазначеному діапазоні ефективних технологічних деформацій призводить до зниження їх міцності більше, ніж у 3,0 рази для ПЕ ніж у 3,7 разу для ПП; більше, ніж у 2,2 рази для ПЕТФ.

В той же час міцність полімерів у вказаному діапазоні порівняно з міцністю при ($\hat{\varepsilon}_2/\varepsilon$ = 0,6) зменшується на 23 % для ПЕ; на 35% для ПП і на 14,8% для ПЕТФ.

За аналогією з попередньою ділянкою, після обробки на поверхні полімерів з'являються ще більш чітко помітні заломи і сліди прокатки.

Таким чином, проведені дослідження показали, що найбільш раціональним діапазоном ефективних значень технологічних деформацій, у межах якого спостерігається найбільш істотне пластичне ослаблення структури полімеру, є інтервал (0,7...0,85) від значення розривної деформації.

Література

1. Synyuk O. Determination of rational structural parameters of devices for polymer recycling / Oleh Synyuk // Scientific Journal of the Ternopil National Technical University. – Ternopil, 2017. – 1. – P. 53-60.

2. Koseki Yu. Crystalline structure and molecular mobility of PVDF chains in PVDF/PMMA blend films analyzed by solid-state F MAS NMR spectroscopy / Yu Koseki, Keitaro Aimi, Shinji Ando // Polymer Journal. – 2012. – № 44. – P. 757–763.

3. Stoclet G. WAXS study of the structural reorganization of semi-crystalline polylactide under tensile drawing / G. Stoclet, R. Seguela, C. Vanmansart, C. Rochas, J.-M. Lefebvre // Polymer Journal. – 2012. – Volume 53. – Issue 2. – P. 519–528.

4. James E. Compositional gradients surrounding spherulites in obsidian and their relationship to spherulite growth and lava cooling / E. James, S. Kenneth, B. Watkins, J. Watkins, M. Hesse, N. Miller // Springer – 2012. – № 4. – P. 229–243.

5. Охлопкова Т. А. Микроскопические исследования деформации растяжения сферолитных структур в полимерных композиционных материалах / Т. А. Охлопкова, Р. В. Борисов, А. А. Охлопкова, А. А. Дьяконов, А. П. Васильев, С. Н. Миронова // Вестник Северо-Восточного федерального университета имени М. К. Аммосова. – 2015. – № 3 (47). – С. 75–87.

6. Синюк О. М. Модель будови недеформованих полімерів сферолітної структури / О. М. Синюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2016. – № 3 (237). – С. 181–188.

7 Синюк О. М. Метод розрахунку ефективних пружних властивостей полімерів з орієнтованою структурою / О. М. Синюк // Технічні науки і технології: науковий журнал Чернігівського національного технологічного університету. – 2016. – № 4. – С. 16–25.

8. Синюк О. М. Визначення пружних властивостей аморфно-кристалічних полімерів сферолітної структури / О. М. Синюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 6. – С. 77–86.

References

1. Synyuk O. Determination of rational structural parameters of devices for polymer recycling / Oleh Synyuk // Scientific Journal of the Ternopil National Technical University. – Ternopil, 2017. – № 1. – P. 53–60.

2. Koseki Yu. Crystalline structure and molecular mobility of PVDF chains in PVDF/PMMA blend films analyzed by solid-state F MAS NMR spectroscopy / Yu Koseki, Keitaro Aimi, Shinji Ando // Polymer Journal – 2012. – № 44. – P. 757–763.

3. Stoclet G. WAXS study of the structural reorganization of semi-crystalline polylactide under tensile drawing / G. Stoclet, R. Seguela, C. Vanmansart, C. Rochas, J.-M. Lefebvre // Polymer Journal. – 2012. – Volume 53. – Issue 2. – P. 519–528.

4. James E. Compositional gradients surrounding spherulites in obsidian and their relationship to spherulite growth and lava cooling / E. James, S. Kenneth, B. Watkins, J. Watkins, M. Hesse, N. Miller // Springer – 2012. – № 4. – P. 229–243.

5. Ohlopkova T. A., Borisov R. V., Ohlopkova A. A., Dyakonov A. A., Vasilev A. P., Mironova S. N. (2015). Mikroskopicheskie issledovaniya deformatsii rastyazheniya sferolitnyih struktur v polimernyih kompozitsionnyih materialah [Microscopic studies of deformation of stretching of spherulitic structures in polymeric composite materials]. *Vestnik Severo-Vostochnogo federalnogo universiteta imeni M. K. Ammosova – Bulletin of the North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov*, no 3 (47), pp. 75-87 [in Russian].

6. Synyuk O.M. (2016). Model budovy nedeformovanykh polimeriv sferolitnoi struktury [The structural model of undeformed polymers of spheruline structure]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu – Herald of Khmelnytsky National University*, 3 (237), 181–188 [in Ukrainian].

7. Synyuk O. M. (2016). Metod rozrakhunku efektyvnykh pruzhnykh vlastyvostei polimeriv z oriientovanoiu strukturoiu [The calculation method of effective elastic properties of oriented polymers]. *Tekhnichni nauky i tekhnolohiyi: naukovyy zhurnal Chernihivs'koho natsional'noho tekhnolohichnoho universytetu – Technical sciences and technologies: scientific journal of Chernihiv National Technological University*, 2016, 4, 16–25 [in Ukrainian].

8. Synyuk O.M. (2016). Vyznachennia pruzhnykh vlastyvostei amorfno-krystalichnykh polimeriv sferolitnoi struktury [Determination of elastic properties of amorphous-crystalline polymers of a spheruline structure]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Bulletin of the Vinnitsa Polytechnic Institute,* 6, 77–86 [in Ukrainian].

Рецензія/Peer review : 07.11.2017 р. Надрукована/Printed :02.12.2017 р.
Статтю представляє д.т.н., проф. Скиба М.Є.

ОБМІН ПРАКТИЧНИМ ДОСВІДОМ, ТЕХНОЛОГІЯМИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

УДК 521.1:523.2:523.6:523.9:524.6:524.8:532.5.01:534.1:621.891

Ю.П. ЗАСПА
Хмельницький національний університет, e-mail: zaspa_yuriy@ukr.net

КОНТАКТНЕ ДИНАМО ЯК ГЕНЕРАТОР КОГЕРЕНТНИХ (КООПЕРАТИВНИХ) КОСМІЧНИХ ФОРМ РУХУ ТА МЕХАНІЗМ ОБ'ЄДНАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО, ГРАВІТАЦІЙНОГО, СИЛЬНОГО І СЛАБКОГО ПОЛІВ. ЧАСТИНА IX. НОВА СТАРА ФІЗИКА

На основі введення вектор-потенціалів, що мають розмірність швидкості, записані подібні за своєю структурою диференційні рівняння для електромагнітного, гравітаційного, сильного і слабкого полів. Перехід до звичних потенціалів електромагнітного та гравітаційного полів здійснюється через окремі калібрувальні константи, що мають розмірність сталої всесвітнього тяжіння. Отримані вирази об'ємної густини енергії та еквівалентної об'ємної густини польової маси для кожного із чотирьох фундаментальних полів, які практично вирішують одіозну проблему темної енергії та прихованої маси в космічних системах. Робиться акцент на неадекватності загальної теорії відносності Ейнштейна, що породила цю проблему. Встановлена топологічна основа кооперативних польових форм руху у космосі, а також топологічна основа маси «елементарних» частинок. Це прямо заперечує штучно введені на сьогодні фізичні стандарти: стандартну космологічну модель (Лямбда – CDM) та стандартну модель фундаментальних взаємодій (SM). Наголошено на необхідності ретельного вивчення філософських концепцій давньокитайського та давньогрецького космогенезу, які більш адекватно (щодо пануючих уявлень) описують хід еволюції Космосу. Розглянуті каскадні процеси турбулентного переносу енергії по спектру збурень у чотирьох базових польових системах та їх комбінаціях. Наявність прямого та оберненого каскадів обумовлює фрактальний характер спектрів, який проявляється, зокрема, у масовому спектрі поширеності нуклідів, спектрах електромагнітного випромінювання радіогалактик, квазарів, залишків наднових зір і т.п., спектрах космічних променів. Наведена фізична схема утворення надсвітлових джетів (із згустків сильного та електромагнітного полів) в активних ядрах галактик, яка пояснює відсутність короткохвильового ГЗК-обрізання в спектрах космічних променів надвисоких енергій. Групова швидкість руху таких джетів значно перевищує швидкість світла у вакуумі, що прямо протирічить постулатам спеціальної теорії відносності Ейнштейна, математично оформленої для уявних точкових об'єктів. Аналізується топологія вихор-хвильових інерційно-дисипативних структур руху, сформованих колективною взаємодією полів. Утворення таких структур пояснює, зокрема, плюм-тектонічну та вулканічну активність земних надр, варіації теплового поля Землі, глобальний рух континентів та циклічність змін клімату. Розглянуті підсистеми набутого хаосу у космосі, структурність яких забезпечується «замороженим» гідродинамічним полем завихореності. Як приклад наводиться гіпотетичне периферійне гало Метагалактики, що знаходиться у тепловій рівновазі з мікрохвильовим фоновим випромінюванням. Набутий, а не « реліктовий», характер цього випромінювання прямо суперечить ілюзорній космологічній моделі Великого Вибуху.

***Ключові слова**: фундаментальні поля, вектор-потенціал, топологія, космогенез, турбулентний каскад, надсвітловий джет, стандартна модель, темна енергія, прихована маса, Великий Вибух, Велика Межа.*

YU. P. ZASPA
Khmelnytsky National University, e-mail: zaspa_yuriy@ukr.net

CONTACT DYNAMO AS A GENERATOR OF THE COHERENT (CO-OPERATIVE) SPACE FORMS OF MOTION AND A MECHANISM OF UNIFICATION OF THE ELECTROMAGNETIC, GRAVITATIONAL, STRONG AND WEAK FIELDS. PART IX. THE NEW OLD PHYSICS

On the basis of vector potentials introduction that have the dimension of velocity, similar in structure differential equations for electromagnetic, gravitational, strong and weak fields are recorded. The transition to the regular potentials of electromagnetic and gravitational fields is performed by individual gauge coupling that have the dimension of gravitational constant. There were discovered the expressions of the energy volume density and the equivalent volume density of the field mass for each of the four fundamental fields that practically solve the odious problem of dark energy and hidden mass in space systems. The emphasis is made on the inadequacy of the Einstein's general theory of relativity that caused such a problem. The topological basis of cooperative field forms of motion in space as well as the topological basis of mass of "elementary" particles is established. It directly denies the physical standards artificially introduced at present: standard cosmological model (Lambda-CDM) and standard model of fundamental interactions (SM). It is stressed that there is the need to study thoroughly the philosophical concepts of ancient Chinese and ancient Greek cosmology as they describe the evolution of the Cosmos more adequately. Cascade processes of turbulent energy transfer in the spectrum of perturbations in four basic field systems and their combinations are considered. The presence of a direct and inverse cascade causes the fractal nature of the spectra that manifests itself in the mass spectrum of the prevalence of nuclides, electromagnetic radiation spectra of radiogalaxies, quasars, remnants of supernovae etc., spectrum of cosmic rays. There is given the physical creation system of overlight jets (from bundles of strong and electromagnetic fields) in the active nuclei of galaxies which explains the absence of short-wave GZK limit in ultra-high energy cosmic rays. The group speed of such jets far exceeds the speed of light in a vacuum that directly denies postulates of the Einstein's special theory of relativity, mathematically designed for imaginary point features. The topology of vortex-wave inertial-dissipative movement patterns, formed by the collective interaction of fields, is analyzed. The creation of such structures explains, in particular, the plume-tectonic and volcanic activity of the Earth's subsoil, variations in the thermal field of the Earth, the global motion of the continents and the cyclical nature of climate change. The subsystems of the acquired chaos in space the structure of which is provided by the "frozen" hydrodynamic field of vorticity are considered. As an example, a hypothetical peripheral halo of Metagalaxy that is in thermal equilibrium with microwave background radiation is conducted. Acquired, but not "relict" character of this radiation directly contradicts the illusory cosmological model of the Big Bang

Key words: *fundamental fields, vector-potential, topology, cosmogenesis, turbulent cascade, overlight jet, standart model, dark energy, hidden mass, the Big Bang,the High Limit.*

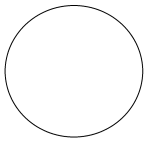
Вступ

Необхідність нової фізики обумовлена внутрішніми протиріччями домінуючих нині концепцій мікро- та макро-Космосу [1–10]. Нову фізику шукають сьогодні в екзотиці – топологічних дефектах, космічних струнах, «кротових норах» і т.п. [9–13]. Однак, як виявилось, нова фізика – це добре забута стара, що міститься, зокрема, у філософських концепціях давньокитайського та давньогрецького космогенезу. Результати пошуку такої фізики, розпочатого у попередніх частинах роботи, наводяться нижче.

Від Хаосу до Космосу

Відомо, що спочатку був Хаос. Перехід до Космосу потребує втручання Творця. Це втручання (у нашому розумінні) виражається у вольовому внесенні кооперації у Хаос. Результат такого втручання, як буде показано нижче, назавжди вкарбувався у генетичну пам'ять чотирьох існуючих на сьогодні фундаментальних полів – електромагнітного, гравітаційного, сильного і слабкого. Ці поля допоки штучно розділені і потребують великого об’єднання, що є однією з головних задач фізики. Таку задачу доцільно розв’язувати на основі введення вектор-потенціалів полів $\vec{\mathbf{V}}$, які мають розмірність швидкості. Перехід до звичних потенціалів електромагнітного та гравітаційного полів може бути здійснений через калібрувальні розмірні константи. Доповнимо графічну схему давньокитайського космогенезу відповідними рівняннями для $\vec{\mathbf{V}}$:

$$\frac{\partial\vec{\mathbf{V}}}{\partial t}+(\vec{\mathbf{V}}\cdot\vec{\nabla})\vec{\mathbf{V}}=0\,,\ \vec{\nabla}\vec{\mathbf{V}}=0\ \text{(хаос) (А)}$$



$$\frac{\partial\vec{\mathbf{V}}}{\partial t}+(\vec{\mathbf{V}}\cdot\vec{\nabla})\vec{\mathbf{V}}=\begin{cases}+\nu^0{}_{co}\cdot(\triangle\vec{\mathbf{V}}-\dfrac{1}{c^2{}_0}\dfrac{\partial^2\vec{\mathbf{V}}}{\partial t^2})\ \text{(електромагнітне поле)}\\ -\nu^0{}_{co}\cdot(\triangle\vec{\mathbf{V}}+\dfrac{1}{c^2{}_0}\dfrac{\partial^2\vec{\mathbf{V}}}{\partial t^2})\ \text{(гравітаційне поле)}\end{cases}\quad\text{(Б)}$$
$$\vec{\nabla}\vec{\mathbf{V}}=0$$

$$\frac{\partial\vec{\mathbf{V}}}{\partial t}+(\vec{\mathbf{V}}\cdot\vec{\nabla})\vec{\mathbf{V}}=\begin{cases}+\nu_{co}\cdot(\triangle\vec{\mathbf{V}}-\dfrac{1}{\upsilon_{ph}{}^2}\dfrac{\partial^2\vec{\mathbf{V}}}{\partial t^2})\ \text{(електромагнітне поле)}\\ -\nu_{co}\cdot(\triangle\vec{\mathbf{V}}+\dfrac{1}{\upsilon_{ph}{}^2}\dfrac{\partial^2\vec{\mathbf{V}}}{\partial t^2})\ \text{(гравітаційне поле)}\end{cases}\quad\text{(В)}$$
$$\vec{\nabla}\vec{\mathbf{V}}\neq 0$$

$$\frac{\partial\vec{\mathbf{V}}}{\partial t}+(\vec{\mathbf{V}}\cdot\vec{\nabla})\vec{\mathbf{V}}=\begin{cases}+\nu_{co}\cdot(\triangle\vec{\mathbf{V}}-\dfrac{1}{\upsilon_{ph}{}^2}\dfrac{\partial^2\vec{\mathbf{V}}}{\partial t^2})\ \text{(електромагнітне поле)}\\ -\nu_{co}\cdot(\triangle\vec{\mathbf{V}}+\dfrac{1}{\upsilon_{ph}{}^2}\dfrac{\partial^2\vec{\mathbf{V}}}{\partial t^2})\ \text{(гравітаційне поле)}\\ +\nu_{co}\cdot(\triangle\vec{\mathbf{V}}+\dfrac{1}{\upsilon_{ph}{}^2}\dfrac{\partial^2\vec{\mathbf{V}}}{\partial t^2})\ \text{(сильне поле)}\\ -\nu_{co}\cdot(\triangle\vec{\mathbf{V}}-\dfrac{1}{\upsilon_{ph}{}^2}\dfrac{\partial^2\vec{\mathbf{V}}}{\partial t^2})\ \text{(слабке поле)}\end{cases}\quad\text{(Г)}$$
$$\vec{\nabla}\vec{\mathbf{V}}\neq 0$$

Тут t – час, $\vec{\nabla}$ – оператор Набла, Δ – оператор Лапласа, $\nu^0{}_{co}$, ν_{co} – відповідно початкова та набута (в процесі еволюції) кооперативна в’язкість динамічної польової системи, c_o, υ_{ph} – відповідно початкова та набута фазова швидкість полів. Параметри $\nu^0{}_{co}$, ν_{co}, як уже зазначалось [14], мають розмірність квадрата довжини, поділеного на час ($см^2/с$ в Гаусовій системі одиниць). За відсутності додаткових умов параметр c_o приймається рівним сучасній швидкості світла у вакуумі c.

Зробимо необхідні коментарі щодо схеми космогенезу (А–Г). Поява ненульової правої частини рівнянь на етапі (Б), власне, й позначає згаданий вольовий перехід від Хаосу до Космосу. Хвиляста крива, що розділяє колишній круг Хаосу, понижуючи його симетрію, символізує динаміку контактної взаємодії новоутворених електромагнітного та гравітаційного полів. Ця графічна Велика Межа (Великий Розділ) на

схемі давньокитайського космогенезу [15] відповідає тому гіпотетичному Великому Контакту [16], що заміняє собою ілюзорний Великий Вибух сучасної фізики. Перехід від бездивергентного (А, Б) до дивергентного (В, Г) вектор-потенціалу $\vec{\mathbf{V}}$ позначений на графічній схемі жовто-блакитним забарвленням секторів поля, що використовується на рівні з більш відомою чорно-білою схематикою інь-ян [15]. Перехід (В-Г) символізує появу двох нових (молодих) полів – сильного і слабкого – на фоні старих (електромагнітного та гравітаційного). Кожне з чотирьох полів окремо позначене зовнішніми комбінаціями двох ліній – суцільної та розривної. Однак, наша інтерпретація цих позначень відрізняється від традиційної – з точністю до навпаки. На наш погляд, розривна лінія позначає знак плюс у правій частині рівнянь для $\vec{\mathbf{V}}$, суцільна, відповідно, – знак мінус. Права частина рівнянь (Б-Г) містить чотири можливих комбінацій цих знаків. При цьому на графічних зображеннях внутрішнім є знак, винесений за дужки, а зовнішнім – той, що в дужках. Праві частини рівнянь (Г) для електромагнітного та слабкого полів, як видно, містять добре відомий оператор Даламбера, що відображає можливість поширення у просторі вільних електромагнітних і слабких хвиль та, відповідно, – потоків фотонів і нейтрино (антинейтрино). Навпаки, внутрішній знак плюс (а не мінус) у відповідних рівняннях для гравітаційного та сильного полів блокує таку можливість та приводить (як буде показано нижче) до вихор-хвильового поширення дисипативних польових структур спеціального виду. Це прямо заперечує прийняту традицію описувати ,зокрема, поширення гравітаційних хвиль рівняннями Даламбера [17] та проводити прямі аналогії між фотоном і гравітоном. Ця хибна традиція, закладена в загальній теорії відносності Ейнштейна, як відомо, нещодавно відзначена черговою Нобелівською премією [8] – до святкування сторіччя цієї теорії.

Врешті зауважимо, що згадана «генетична пам'ять» про вольове внесення кооперації у хаос залишається і в аналогічних щодо (Б-Г) рівняннях руху матеріального середовища – із заміною полів вектор-потенціалів $\vec{\mathbf{V}}$ на поля швидкості частинок середовища $\vec{\upsilon}$. Ця топологічна аналогія, відмічена раніше для електромагнітного поля [14], буде доповнена і конкретизована нижче для всіх чотирьох видів фундаментальних полів.

Електромагнітне поле

Перехід від звичного вектор-потенціалу електромагнітного поля $\vec{\mathrm{A}}$ до відповідного «швидкісного» вектор-потенціалу $\vec{\mathbf{V}}_{e/m}$ здійснюється наступним чином:

$$\vec{\mathrm{A}}=\frac{c}{\sqrt{g_{e/m}}}\cdot\vec{\mathbf{V}}_{e/m}, \tag{1}$$

де $g_{e/m}$ – калібрувальна константа електромагнітного поля, що має розмірність сталої всесвітнього тяжіння G. Числове значення $g_{e/m}$, як і розглянуті нижче аналогічні значення калібрувальних констант для інших полів, на сьогодні не відомі. Їх встановлення становить окрему задачу, що виходить за рамки даної роботи. Однак, відмітимо, що наявність $g_{e/m}$ породжує нову фундаментальну одиницю довжини $l_{e/m}$, відмінну чисельно від добре відомої Планківської довжини [18, 19], а саме:

$$l_{e/m}=(g_{e/m}\cdot\hbar/c^3)^{1/2}, \tag{2}$$

де $\hbar$ – редукована постійна Планка.

Співставимо рівняння (В-Г) для $\mathbf{V}_{e/m}$ з рівняннями для $\vec{\mathrm{A}}$, отриманими на основі системи рівнянь Максвелла для електромагнітного поля в однорідному ізотропному середовищі (в Гаусовій системі одиниць):

$$rot\vec{E}=-\frac{1}{c}\frac{\partial\vec{\mathrm{B}}}{\partial t},\ rot\vec{\mathrm{B}}=\frac{4\pi\mu}{c}\vec{j}+\frac{\varepsilon\mu}{c}\frac{\partial\vec{\mathrm{E}}}{\partial t} \tag{3, 4}$$

$$\vec{\nabla}\vec{\mathrm{E}}=4\pi\rho_e/\varepsilon,\ \vec{\nabla}\vec{\mathrm{B}}=0. \tag{5, 6}$$

Тут

$$\vec{\mathrm{E}}=-\frac{1}{c}\frac{\partial\vec{\mathrm{A}}}{\partial t}-\vec{\nabla}\varphi,\ \vec{\mathrm{B}}=rot\vec{\mathrm{A}} \tag{7, 8}$$

– відповідно напруженість електричного та індукція магнітного поля, φ – скалярний потенціал електромагнітного поля, $\vec{j}$ – густина електричного струму, ρ_e – об'ємна густина електричного заряду, ε, μ – відносна діелектрична та відносна магнітна проникності середовища.

Для замикання системи (3–8) використаємо звичний вираз для густини струму в рухомому середовищі:

$$\vec{j}=\rho_e\cdot\vec{\upsilon}+\sigma\left(\vec{\mathrm{E}}+\frac{1}{c}\left[\vec{\upsilon}\times\vec{\mathrm{B}}\right]\right), \tag{9}$$

де $\vec{\upsilon}$ – швидкість елементів рухомого середовища, σ – електрична провідність середовища.

На основі співвідношень (3–9) отримуємо наступне рівняння для вектор-потенціалу $\vec{\mathrm{A}}$:

$$\frac{\partial\vec{\mathrm{A}}}{\partial t}+\vec{\nabla}(c\varphi)-\left[\vec{\upsilon}\times rot\vec{\mathrm{A}}\right]=\nu_m\cdot(\Delta\vec{\mathrm{A}}-\frac{\varepsilon\mu}{c^2}\frac{\partial^2\vec{\mathrm{A}}}{\partial t^2})+\frac{c}{\sigma}\cdot\rho_e\vec{\upsilon}, \tag{10}$$

де $\nu_m = \frac{c^2}{4\pi\mu\sigma}$ (11) – т.з. «магнітна в'язкість» [20] середовища.

При виводі (10) використана наступна калібрувальна умова для потенціалів електромагнітного поля [14]:

$$\vec{\nabla}(\vec{\nabla}\vec{A} + \frac{\varepsilon\mu}{c}\frac{\partial\varphi}{\partial t}) = 0\,. \tag{12}$$

Накладемо на потенціали в силу їх неоднозначності ще одну калібрувальну умову:

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{\sqrt{g_{e/m}}}{c^2}\cdot A^2/2\,, \tag{13}$$

де φ_0 – та частина скалярного потенціалу поля, що пов'язана з дивергенцією $\vec{E}$. У випадку електронейтрального середовища ($\rho_e = 0$) ця дивергенція згідно з (5) зануляється, як і φ_0. В такому випадку можливе вирівнювання гідродинамічного та електромагнітного вектор-потенціалів:

$$\vec{\upsilon} = \vec{\mathbf{V}}_{e/m} = \frac{\sqrt{g_{e/m}}}{c}\cdot\vec{A}\,. \tag{14}$$

За цієї умови (із застосуванням відомої формули Лемба-Громеко векторного аналізу) із (10–13) слідує:

$$\frac{\partial\vec{A}}{\partial t} + \frac{\sqrt{g_{e/m}}}{c}(\vec{A}\cdot\vec{\nabla})\vec{A} = \nu_m\cdot(\vartriangle\vec{A} - \frac{\varepsilon\mu}{c^2}\frac{\partial^2\vec{A}}{\partial t^2}) \tag{15}$$

або ж із врахуванням (1, 14):

$$\frac{\partial\vec{\mathbf{V}}_{e/m}}{\partial t} + (\vec{\mathbf{V}}_{e/m}\cdot\vec{\nabla})\vec{\mathbf{V}}_{e/m} = \nu_m\cdot(\vartriangle\vec{\mathbf{V}}_{e/m} - \frac{\varepsilon\mu}{c^2}\frac{\partial^2\vec{\mathbf{V}}_{e/m}}{\partial t^2})\,, \tag{16}$$

що співпадає з першими рівняннями в системах (В-Г) при

$$\nu_{co} = \nu_m\,,\ \upsilon_{ph}{}^2 = c^2/\varepsilon\mu\,. \tag{17, 18}$$

Магнітна складова густини енергії поля виражається через $\vec{\mathbf{V}}_{e/m}$ наступним чином:

$$e_m = \frac{B^2}{8\pi\mu} = \frac{c^2}{8\pi\mu g_{e/m}}\cdot(rot\vec{\mathbf{V}}_{e/m})^2 \tag{19}$$

Ввівши позначення об'ємної густини магнітно-польової маси ρ_m, матимемо:

$$e_m = \rho_m\cdot c^2\,,\ \rho_m = \frac{(rot\vec{\mathbf{V}}_{e/m})^2}{8\pi\mu g_{e/m}} \tag{20, 21}$$

Як видно, і густина магнітної енергії, і густина відповідної еквівалентної польової маси, визначаються просторовим розподілом завихореності вектор-потенціалу поля. В топологічній інтерпретації [14, 21] з врахуванням умови (14) (вирівнювання потенціалів) це означає повну топологічну аналогію гідродинамічного поля завихореності $\vec{\Omega} = rot\vec{\upsilon}$ та магнітного поля $\vec{B} = rot\vec{A} = \frac{c}{\sqrt{g_{e/m}}}rot\vec{\mathbf{V}}_{e/m}$.

Введення калібрувальної константи $g_{e/m}$,таким чином, повністю «урівнює в правах» поля $\vec{\Omega}$ та $\vec{B}$, формуючи спільний спектр топологічно обумовлених [21] частот когерентних структур руху:

$$\omega_B{}^n = \omega_\Omega{}^n\,, \tag{22}$$

де

$$\omega_B{}^n = \frac{\sqrt{g_{e/m}}}{c}\alpha_{Kn}(h_B)\cdot\Phi_B\cdot V_B{}^{-2/3}\,,\ \omega_\Omega{}^n = \beta_{Kn}(h_\Omega)\cdot\Phi_\Omega\cdot V_\Omega{}^{-2/3} \tag{23, 24}$$

Тут $\alpha_{Kn}(h_B)$, $\beta_{Kn}(h_\Omega)$ – безрозмірні параметри, що залежать лише від топології полів $\vec{B}$ та $\vec{\Omega}$ [21–23], h_B, h_Ω – відповідні суми кручення та згину для трубок магнітного поля і поля завихореності [22, 23], Φ_B, Φ_Ω – потоки магнітного поля та завихореності через перерізи трубок полів, V_B, V_Ω – об'єми трубок. При цьому рішення відповідних варіаційних задач щодо мінімізації функціоналів [22, 23] накладають обмеження на магнітну енергію та гідродинамічну енстрофію (інтегральний квадрат завихореності):

$$\int_D\frac{B^2}{2}dV \ge q_0\cdot|H_B|\,,\ \int_D\frac{\Omega^2}{2}dV \ge q_0'\cdot|H_\Omega|\,. \tag{25, 26}$$

Тут q_0, q_0' – найменші власні значення (додатні) рішень відповідних варіаційних задач [22, 23], H_B, H_Ω – магнітна та гідродинамічна спіральності. Акцентуємо увагу на принциповій розбіжності нашої оцінки топологічної еквівалентності полів $\vec{B}(rot\vec{\mathbf{V}}_{e/m})$ та $\vec{\Omega}$ [14, 21] з позицією авторів робіт [22, 23], які настоюють на еквівалентності полів $\vec{B}$ та $\vec{\upsilon}$.

Важливо відмітити також, що використана тут дивергентність вектор-потенціалу електромагнітного поля $(\vec{\nabla}\vec{\mathbf{V}}_{e/m} \neq 0)$ суттєво розширює клас електромагнітних полів, зведених теоретиками локальної квантової теорії поля (КТП) [17–20, 24] лише до набору фотонів з бездивергентним вектор-потенціалом $(\vec{\nabla}\vec{\mathrm{A}} = 0)$.

Гравітаційне поле

Якщо рівень розвитку класичної електродинаміки досяг апогею ще в часи Фарадея–Максвелла, то сучасна теорія гравітації «з легкої руки» Альберта Ейнштейна (безнадійно спотворивши Ньютонів аналог електростатики Кулона) попрямувала в бік скривлення часу, простору… та наукової гідності. Перетворена врешті в релігію «під Ейнштейна», ця теорія вже століття насильно і цілеспрямовано впроваджується в фізику з використанням фінансового підкупу, підтасовок параметрів задачі та перекручень експериментальних даних. Одіозна проблема темної енергії та прихованої маси впирається саме в неадекватність вихідних постулатів та принципів загальної теорії відносності Ейнштейна.

На противагу до цього, запишемо гравітаційний аналог системи рівнянь Максвелла, що включає не тільки потенційну, але й вихрові компоненти гравітаційного поля:

$$rot\overrightarrow{\mathrm{E}_{gr}} = -\frac{1}{c}\frac{\overrightarrow{\mathrm{B}_{gr}}}{\partial t},\ rot\overrightarrow{\mathrm{B}_{gr}} = -\frac{4\pi\mu_{gr}g_{gr}}{c}\cdot\overrightarrow{j_{gr}} - \frac{\varepsilon_{gr}\mu_{gr}}{c}\frac{\partial\overrightarrow{\mathrm{E}_{gr}}}{\partial t} \tag{27, 28}$$

$$\vec{\nabla}\overrightarrow{\mathrm{E}_{gr}} = -4\pi\rho\cdot g_{gr}/\varepsilon_{gr},\ \vec{\nabla}\overrightarrow{\mathrm{B}_{gr}} = 0 \tag{29, 30}$$

Тут $\overrightarrow{\mathrm{E}_{gr}}$, $\overrightarrow{\mathrm{B}_{gr}}$ – напруженість та індукція гравітаційного поля, $\varepsilon_{gr}\mu_{gr}$ – гравітаційні аналоги ε та μ, ρ – густина маси, $\overrightarrow{j_{gr}}$ – гравітаційний аналог густини струму, g_{gr} – калібрувальна константа гравітаційного поля. Остання, взагалі кажучи, може не співпадати з G, оскільки константа G описує парну (а не колективну) гравітаційну взаємодію згідно з законом Ньютона.

Введемо вектор-потенціали гравітаційного поля:

$$\overrightarrow{\mathrm{W}_{gr}} = c\overrightarrow{\mathbf{V}_{gr}} \tag{31}$$

— такі, що відповідають умовам:

$$\overrightarrow{\mathrm{E}_{gr}} = -\frac{1}{c}\frac{\partial\overrightarrow{\mathrm{W}_{gr}}}{\partial t} - \vec{\nabla}\varphi_{gr},\ \overrightarrow{\mathrm{B}_{gr}} = rot\overrightarrow{\mathrm{W}_{gr}}, \tag{32, 33}$$

де φ_{gr} – скалярний потенціал поля.

Суттєвою відмінністю системи (29–33) від рівнянь гравітоелектромагнетизму [25] є знак мінус (а не плюс) перед останнім членом у (28), що по суті унеможливлює поширення у вакуумі вільних гравітаційних хвиль, аналогічних електромагнітним. Іншою важливою відмінністю є врахування у $\overrightarrow{j_{gr}}$ не тільки конвективної складової $\rho\cdot\vec{\upsilon}$, але й аналога струму провідності:

$$\overrightarrow{j_{gr}} = \rho\vec{\upsilon} + \sigma_{gr}\cdot\left(\overrightarrow{\mathrm{E}_{gr}} + \frac{1}{c}\left[\vec{\upsilon}\times\overrightarrow{\mathrm{B}_{gr}}\right]\right), \tag{34}$$

де $\vec{\upsilon}$ – швидкість елемента середовища, σ_{gr} – гравітаційна провідність, що має розмірність добутку густини на час. Домножена на g_{gr}, ця провідність за розмірністю співпадає з $\sigma\left(c^{-1}\right)$.

Повторивши аналогічні щодо електромагнітного поля викладки, отримаємо:

$$\frac{\partial\overrightarrow{\mathrm{W}_{gr}}}{\partial t} + \vec{\nabla}(c\varphi_{gr}) - \left[\vec{\upsilon}\times\overrightarrow{\mathrm{B}_{gr}}\right] = -\nu_{gr}\cdot\left(\triangle\overrightarrow{\mathrm{W}_{gr}} + \frac{\varepsilon_{gr}\mu_{gr}}{c^2}\frac{\partial^2\overrightarrow{\mathrm{W}_{gr}}}{\partial t^2}\right) + \frac{c}{\sigma_{gr}}\cdot\rho\vec{\upsilon}, \tag{35}$$

$$\text{де } \nu_{gr} = \frac{c^2}{4\pi\mu_{gr}g_{gr}\sigma_{gr}} \tag{36}$$

– відповідна гравітаційна вязкість.

При виведенні (35) використана наступна калібрувальна умова для потенціалів поля:

$$\vec{\nabla}\left(\vec{\nabla}\overrightarrow{\mathrm{W}_{gr}} - \frac{\varepsilon_{gr}\mu_{gr}}{c}\frac{\partial\varphi_{gr}}{\partial t}\right) = 0 \tag{37}$$

В силу неоднозначності потенціалів накладемо на них ще одну калібрувальну умову:

$$\varphi_{gr} = \varphi^0{}_{gr} + \mathbf{V}^2{}_{gr}/2, \tag{38}$$

де $\varphi^0{}_{gr}$ – та частина скалярного потенціалу, що не залежить від $\mathbf{V}_{gr}$. На відміну від (10), останній член в (35) не зануляється, оскільки існує «масовий заряд» лише одного знаку.

Однак, зі зменшенням ρ та збільшенням σ_{gr} цим членом можна знехтувати, що адекватно зокрема для галактичного і метагалактичного середовища. В такому випадку

$$\varphi_{gr} \approx \mathbf{V}^2{}_{gr} / 2 \tag{39}$$

і за умови вирівнювання гідродинамічного та гравітаційного вектор-потенціалів

$$\vec{\upsilon} = \overrightarrow{\mathbf{V}_{gr}} \tag{40}$$

з (35, 39) слідує:

$$\frac{\partial \overrightarrow{\mathbf{V}_{gr}}}{\partial t} + (\overrightarrow{\mathbf{V}_{gr}} \cdot \vec{\nabla})\overrightarrow{\mathbf{V}_{gr}} = -\nu_{gr} \cdot (\triangle \overrightarrow{\mathbf{V}_{gr}} + \frac{\varepsilon_{gr}\mu_{gr}}{c^2}\frac{\partial^2 \overrightarrow{\mathbf{V}_{gr}}}{\partial t^2}) . \tag{41}$$

Цей вираз співпадає з відповідними рівняннями для гравітаційного поля в системах (В-Г) при

$$\nu_{co} = \nu_{gr} , \ \upsilon^2_{ph} = c^2 / \varepsilon_{gr}\mu_{gr} \tag{42, 43}$$

Об'ємна густина «магнітно»-гравітаційної енергії поля задається виразом:

$$e_{gr}{}^{m} = \frac{(rot\overrightarrow{\mathbf{W}_{gr}})^2}{8\pi\mu_{gr}g_{gr}} = \frac{c^2 \cdot (rot\overrightarrow{\mathbf{V}_{gr}})^2}{8\pi\mu_{gr}g_{gr}} \tag{44}$$

Відповідна еквівалентна густина «магнітно»-гравітаційної польової маси $\rho_{gr}{}^{m}$ становить:

$$e_{gr}{}^{m} = \rho_{gr}{}^{m} \cdot c^2 , \ \rho_{gr}{}^{m} = \frac{(rot\overrightarrow{\mathbf{V}_{gr}})^2}{8\pi\mu_{gr}g_{gr}} \tag{45, 46}$$

Як і для електромагнітного поля, тут існує повна топологічна аналогія поля завихореності гравітаційного вектор-потенціалу $rot\overrightarrow{\mathbf{V}_{gr}}$ та гідродинамічного поля завихореності $\vec{\Omega}$. Ця аналогія лежить в основі утворення когерентних (кооперативних) електромагнітно-гравітаційно-гідродинамічних структур руху, що мінімізують свою гідродинамічну ентрофію, магнітну та «магнітно»-гравітаційну енергію.

Вирази (19–21) та (44–46), власне, й проливають світло на одіозну темну енергію та темну матерію – предмет безнадійних пошуків сучасної фізики. Вони дещо нагадують за формою широко відомі результати з лямбда-членом в рівняннях Ейнштейна [4, 26, 27], однак вельми далекі від них за своєю суттю.

Сильне та слабке поля

Ці поля, що ,судячи з відсутності далекодії, не мають дивергенції напруженостей, безпосередньо описуються відповідними рівняннями в системі (Г) для вектор-потенціалів $\vec{\mathbf{V}}_s$ та $\vec{\mathbf{V}}_w$.

Введемо відповідні напруженості $\vec{\mathrm{E}}_s$, $\vec{\mathrm{E}}_\omega$, скалярні потенціали φ_s, φ_w та індукції $\vec{\mathrm{B}}_s$, $\vec{\mathrm{B}}_w$ сильного і слабкого полів

$$\vec{\mathrm{E}}_s = -\frac{1}{c}\frac{\partial \vec{\mathbf{V}}_s}{\partial t} - \vec{\nabla}\varphi_s , \ \varphi_s = \mathbf{V}_s{}^2 / 2c \tag{47, 48}$$

$$\vec{\mathrm{E}}_w = -\frac{1}{c}\frac{\partial \vec{\mathbf{V}}_w}{\partial t} - \vec{\nabla}\varphi_w , \ \varphi_w = \mathbf{V}_w{}^2 / 2c \tag{49, 50}$$

$$\vec{\mathrm{B}}_s = rot\vec{\mathbf{V}}_s , \ \vec{\mathrm{B}}_w = rot\vec{\mathbf{V}}_w \tag{51, 52}$$

В таких позначеннях об’ємні густини відповідних «електро»-сильних $e_s{}^{e}$, «магнітно»-сильних $e_s{}^{m}$, «електро»-слабких $e_w{}^{e}$, «магнітно»-слабких $e_w{}^{m}$ енергій полів запишуться наступним чином

$$e_s{}^{e} = \frac{\varepsilon_s \cdot (\frac{\partial \vec{\mathbf{V}}_s}{\partial t} + \vec{\nabla}(\mathbf{V}_s{}^2 / 2))^2}{8\pi g_s} , \ e_s{}^{m} = \frac{c^2 \cdot (rot\vec{\mathbf{V}}_s)^2}{8\pi\mu_s g_s} \tag{53, 54}$$

$$e_w{}^{e} = \frac{\varepsilon_w \cdot (\frac{\partial \vec{\mathbf{V}}_w}{\partial t} + \vec{\nabla}(\mathbf{V}_w{}^2 / 2))^2}{8\pi g_w} , \ e_w{}^{m} = \frac{c^2 \cdot (rot\vec{\mathbf{V}}_w)^2}{8\pi\mu_w g_w} \tag{55, 56}$$

Повні (сумарні) густини відповідних польових енергій задаються як

$$e_s = e_s{}^{e} + e_s{}^{m} , \ e_w = e_w{}^{e} + e_w{}^{m} \tag{57, 58}$$

Запишемо також аналогічні вирази для еквівалентних густин «електро»-сильної $\rho_s{}^{e}$, «магнітно»-сильної $\rho_s{}^{m}$, «електро»-слабкої $\rho_w{}^{e}$, «магнітно»-слабкої $\rho_w{}^{m}$ польових мас:

$$\rho_s{}^{e} = \frac{\varepsilon_s \cdot (\frac{\partial \vec{\mathbf{V}}_s}{\partial t} + \vec{\nabla}(\mathbf{V}_s{}^2 / 2))^2}{8\pi c^2 g_s} , \ \rho_s{}^{m} = \frac{(rot\vec{\mathbf{V}}_s)^2}{8\pi\mu_s g_s} \tag{59, 60}$$

$$\rho_w{}^{e} = \frac{\varepsilon_w \cdot (\frac{\partial \vec{\mathbf{V}}_w}{\partial t} + \vec{\nabla}(\mathbf{V}_w{}^2 / 2))^2}{8\pi c^2 g_w} , \ \rho_w{}^{m} = \frac{(rot\vec{\mathbf{V}}_w)^2}{8\pi\mu_w g_w} \tag{61, 62}$$

Повні (сумарні) густини еквівалентних польових мас запишуться відповідно у вигляді:

$$\rho_s = \rho_s^{\,e} + \rho_s^{\,m},\ \rho_w = \rho_w^{\,e} + \rho_w^{\,m} \qquad (63, 64)$$

У вище наведених співвідношеннях ε_s, ε_ω, μ_s, μ_w – відповідні аналоги електричної та магнітної проникності для сильного і слабкого полів, g_s, g_w – калібрувальні константи полів. Вирази (59–64) свідчать про топологічний характер маси «елементарних» частинок, яка залишається досі однією з найбільших загадок у фізиці (поряд з електричним зарядом та спіном). Такий характер маси прямо заперечує точковість цих частинок, покладену в математичну основу спеціальної теорії відносності Ейнштейна [17], а також в основу локальної квантової теорії поля [18, 19, 24]. Математичне знущання над фізичним вакуумом, яким так гордиться квантова електродинаміка, захоплена ідеєю перенормувань [18, 19, 24], явно не проходить в т.з. квантовій хромодинаміці – передусім саме з топологічних міркувань.

Ілюзорна асимптотична свобода [3, 4] та конфайнмент – деконфайнмент [18, 19, 28–30] неіснуючих кварків, що обмінюються неіснуючими глюонами, може сперечатись лишень з абсурдом бозона Хіггса [7, 9, 10], що ніби-то наділяє масою калібрувальні бозони слабкої взаємодії [18, 19]. Авторам такого роду ідей слід розширити свій кругозір за межі сучасної стандартної моделі (SM), яка цілком ігнорує колективну взаємодію в польових структурах. Зухвала підміна чотирьох фундаментальних полів чотирма «фундаментальними» взаємодіями (через посередників) вже між дванадцятьма вельми довільно вибраними «фундаментальними полями» (шести з яких – кваркових – взагалі не існує в природі) ставить SM в один ряд із стандартною космологічною моделлю Лямбда-CDM [5, 6]. Цей абсурд «тріумфально» завершує недавнє «відкриття» гравітаційних хвиль [8, 31], що й знаменує собою остаточне переформатування фізики у згадану вже релігію. В такому контексті аналіз фактичних даних, що наводиться нижче, слід сприймати не інакше, як прояв атеїзму.

Калібрування потенціалів сильного і слабкого полів

Співвідношення (53–64) допускають два додаткових щодо (12, 37) калібрування потенціалів, які зберігають «електро»-сильну («електро»-слабку) компоненти об’ємної густини енергії та, відповідно, еквівалентної польової маси:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial \vec{\mathrm{V}}}{\partial t} + \vec{\nabla}(c\varphi)\right) = 0,\ \vec{\nabla}\left(\frac{\partial \vec{\mathrm{V}}}{\partial t} + \vec{\nabla}(c\varphi)\right) = 0 \qquad (65, 66)$$

Цей вид калібрування потенціалів, як доводить аналіз технічних, космічних та «мікрокосмічних» (сильного і слабкого полів) систем, описує струменеві (джетові) та змішані (гібридні) польові форми руху, що виходять за рамки системи рівнянь Максвелла та вищенаведених аналогів таких рівнянь для гравітаційного поля.

Калібрування (65, 66) справедливі для всіх типів полів і разом з (12, 37) пояснюють динаміку «кооперативів» збурень у найрізноманітніших системах. До прикладу, на рис. 1 наведені акустичні спектри в технічних системах різання та кочення, де спостерігається виражене розділення на три кластери: низькочастотний, що відповідає калібрувальній умові (12) для гідродинамічного поля швидкості $\vec{\upsilon}$, високочастотний, що задається умовою (65), та середньочастотний, який описується виразом (66) – із заміною $\vec{\mathrm{V}}$ на $\vec{\upsilon}$ та з підстановкою $\varphi = \upsilon^2 / 2c$.

Наведемо деякі приклади зі сфер дії сильного та слабкого полів, що носять принциповий характер. По-перше, спростуємо одну з базових спекуляцій спеціальної теорії відносності Ейнштейна щодо подовження часу життя мюонів (народжених у верхніх шарах атмосфери Землі під дією космічних променів), яке ніби-то має суто релятивістський характер [18, 19]. Насправді ж, як слідує з умови (65), сталість у часі «електро»-слабкої густини енергії (і маси) мюонів в умовах значних градієнтів $c\varphi$ при гальмуванні мюонів в атмосфері та в тілі Землі забезпечується саме відповідним падінням $\partial\vec{\mathrm{V}} / \partial t$, тобто різким збільшенням часу життя мюонів. Мюони ,таким чином, являють собою типові джети зі згустків слабкого та електромагнітного полів, що підтримують свій час життя за рахунок різноманітних каналів дисипації енергії руху. За відсутності такої дисипації, як відомо [18, 19], вони живуть в середньому біля двох мікросекунд.

Інший приклад стосується сильного поля. На сьогодні нема адекватного пояснення щодо того, чому т.з. «мезони з прихованим шармом» мають на 3-4 порядки меншу ширину ліній, ніж бозонні резонанси майже тієї ж маси [18, 19]. Як видно з (59–64), еквівалентна густина польової маси складається з «електричної» компоненти, яка залежить від часу життя польової форми, та «магнітної», що не залежить від нього. Отже, сума (63), або ж (64), для зовсім різних за часом життя (і шириною лінії) форм («елементарних» частинок) може співпадати ,чи бути дуже близькою, за рахунок однієї домінуючої компоненти – «електричної» або ж «магнітної».

В космічних системах калібрувальна умова (66) описує турбулентно-хвильовий гравітаційний колапс, що зазвичай зводиться до моделей Джинса, чи їх модифікацій [18, 19]. Умова (65) описує джети різного виду – від сонячних спікул до ультрарелятивістських джетів активних ядер галактик. Надсвітлові джети із згустків сильного поля, що формують спектри космічних променів надвисоких енергій, розглядаються нижче.

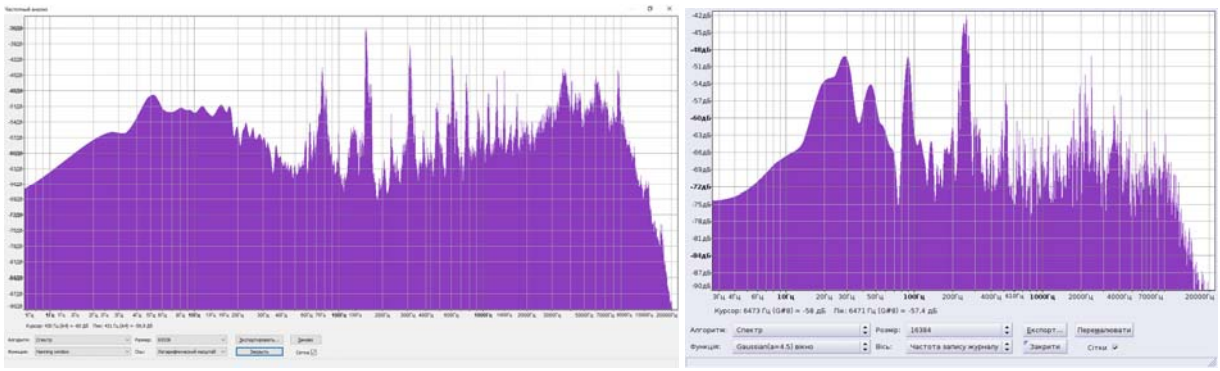


Рис. 1. Акустичні спектри в технічних системах різання (зліва) і кочення (справа)

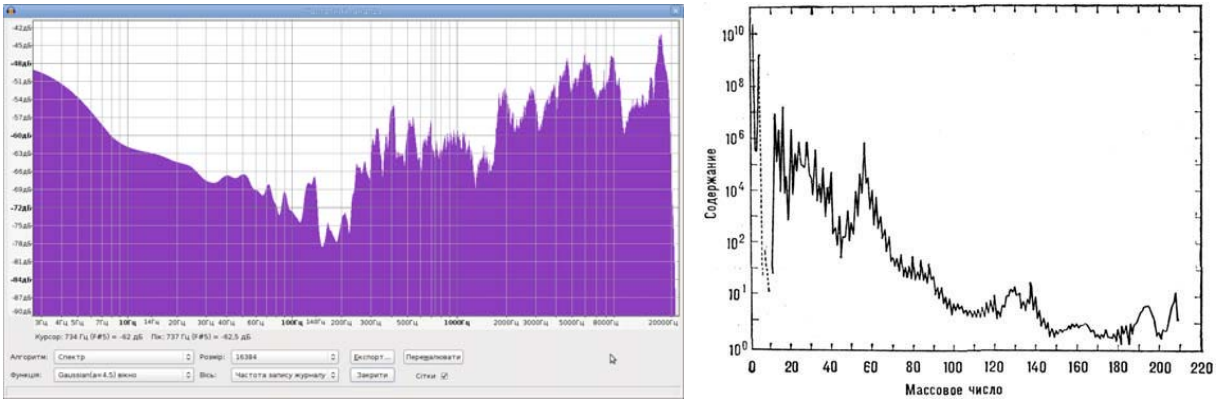


Рис. 2. Акустичний спектр процесу різання (зліва) та масова спектрограма поширеності нуклідів у Сонячній системі [18] (справа)

Врешті зауважимо, що зміна прийнятої калібрувальної умови потенціалів вельми небезпечна для існування тієї чи іншої польової форми руху, оскільки така зміна еквівалентна зміні її топології. Такого роду катастрофічні процеси відображаються, зокрема, у сонячних спалахах, вибухах нових і наднових зір, взаємоперетворенні «елементарних» частинок. Утворення космічних джетів, а також мод витікання за межі системи за умови (65) не описується рівняннями Максвелла (для яких дійсна умова (12)) і виходить не тільки за рамки МГД, але й за межі всіх відомих на сьогодні теорій та моделей.

Каскадний транспорт енергії збурень в кооперативних польових системах

Колективна взаємодія різних форм руху в динамічних польових системах веде до каскадного перенесення енергії по спектру. В технічних та космічних системах спостерігаються як прямий (в сторону менших часових і просторових масштабів) так і обернений (в сторону більших масштабів) каскади [14, 16, 21]. До прикладу, на рис. 3 наведена магнітограма радіальної компоненти поверхневого геліомагнітного поля (на Сонці), яка чітко фіксує як глобальну картину поля, утворену в результаті оберненого каскаду, так і дрібномасштабні локалізовані структури поля в низьких широтах – продукти прямого каскаду (більш відомі як сонячні плями).

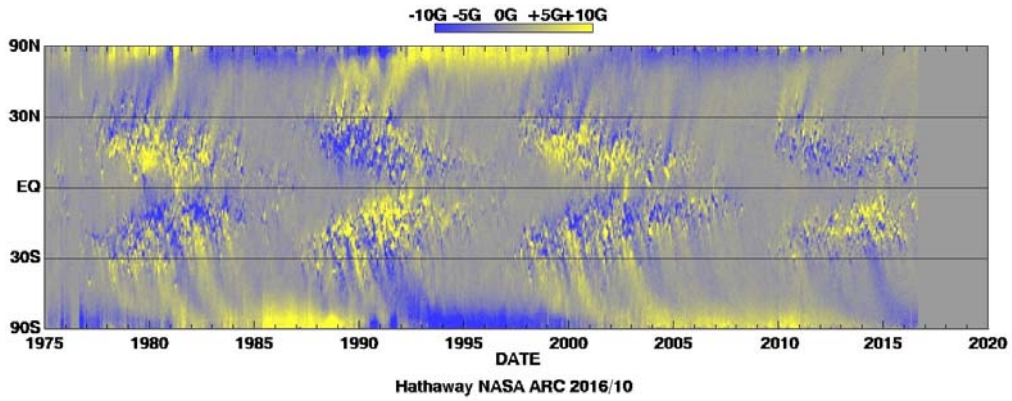


Рис. 3. Синоптична магнітограма радіальної компоненти поверхневого геліомагнітного поля [39]

Накладання двох протилежно направлених енергетичних потоків формує фрактальний вид спектрів збурень [14, 21, 32]. Для порівняння на рис. 1,2 наведені акустичні емісійні спектри в технічних системах, а також масовий спектр поширеності нуклідів в Сонячній системі. Перші утворені гідродинамічними

структурами електромагнітного поля, останній – структурами сильного поля. Подібність спектрів свідчить про загальний характер колективної взаємодії у польових системах різного виду та масштабу. Це цілком ігнорується в квантовій хромодинаміці та фізиці елементарних частинок загалом, де для описання, зокрема, фрактального спектру адронів залучено штучні нагромадження мультиплетів, супермультиплетів та супер-супер-мультиплетів, унітарних симетрій різного рівня (які постійно спонтанно порушуються), та немислимий набір ерзац-зарядів, для яких вже не вистачає фізичних термінів: колір, шарм, краса, дивність і т.п. [9, 10, 18, 19].

Порівняння спектрів збурень електромагнітного та сильного полів (рис. 2) виявляє, між тим, одну важливу різницю. Якщо для перших характерне підвищення когерентності в сторону малих масштабів, то для других - навпаки. Виходячи з попереднього аналізу [14], це пов'язано з тим, що в рівняннях систем (В-Г) для електромагнітного та гравітаційного полів кожний член лівої частини за модулем перевищує кожний член правої. Це приводить до наступного дисперсійного рівняння спектру збурень:

$$\omega = N_{ch} \cdot \nu_{co} \cdot k^2 = \frac{\upsilon_{ph}^{\ 2}}{N_{ch} \cdot \nu_{co}}, \tag{67}$$

де ω, k – циклічна частота та хвильове число, N_{ch} – параметр когерентності [14].

Вказана вище різниця у спектрах свідчить про те, що для сильного і слабкого полів ,навпаки, кожний окремо взятий член у правих частинах рівнянь (Г) перевищує за модулем члени у лівих частинах. Відповідно, для спектрів колективних взаємодій в системах сильного і слабкого полів маємо наступне дисперсійне рівняння:

$$\omega = \frac{\nu_{co} \cdot k^2}{N_{ch}} = \frac{N_{ch} \cdot \upsilon_{ph}^{\ 2}}{\nu_{co}} \tag{68}$$

Пониження когерентності у спектрах збурень сильного поля в сторону малих масштабів безпосередньо проявляється в процесах утворення баріонних та мезонних резонансів, що характеризуються вкрай малим часом життя та відносно великою спектральною шириною лінії [18, 19]. Обернений каскад в системах слабкого поля проявлений ,зокрема, в ланцюжку розпадів τ–лептон–мюон–електрон. Прямий каскад – у випромінюванні широкого спектру нейтрино (антинейтрино).

Найважливішими в рамках даного розгляду є спектри та відповідні структури космічних систем, що не мають адекватного пояснення без врахування механізмів колективної взаємодії. До прикладу, на рис. 4 наведені комірчасті та філаментні метагалактичні структури, що «впевнено» відносять на рахунок темної матерії та темної енергії [33, 34]. В дійсності ж, ці топологічні структури утворені вище розглянутою концентрацією завихореностей гравітаційного та електромагнітного полів. Те, що ці поля можуть існувати незалежно від мас і зарядів (та за їх відсутності) ніяк не вкладається в існуючі рамки. Аналогічно до цього, не має пояснення «змова» галактичних дисків та гало [35], яка виражається в плавному переході від насичених зорями дисків до розріджених галактичних гало, та неодмінно адресується темній матерії [35]. Насправді ж, при переході диск – гало відбувається «зміна лідера» когерентної польової структури руху:

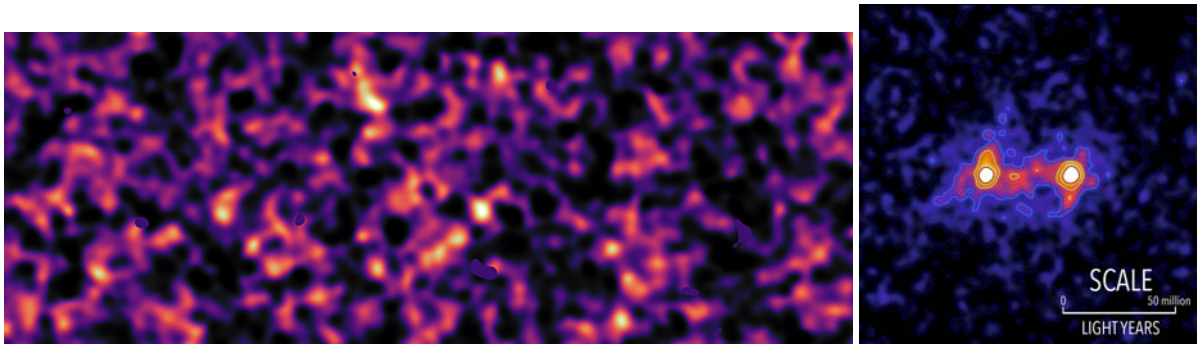


Рис. 4. Комірчасті [33] (зліва) та філаментні [34] (справа) метагалактичні структури, що традиційно відносять на рахунок темної матерії та темної енергії

від гідродинамічного поля швидкостей $\vec{\upsilon}$ у диску (з відповідною завихореністю $\vec{\Omega}$) до гравітаційного поля $\vec{V}_{gr}$ у гало (з відповідною завихореністю $rot\vec{V}_{gr}$). Аналогічна «зміна лідера» в потрійній системі $\vec{\upsilon} - \vec{V}_{e/m} - \vec{V}_{gr}$ спостерігається в дисипативній динаміці сонячних плям, що виходять на поверхню Сонця – рис. 5.

Потужне електромагнітне випромінювання радіогалактик, квазарів, залишків наднових зір і т.п. [14, 32], що має немонотоний спектр, в середньому близький до степеневого, пояснюється прямою конверсією крупномасштабного гравітаційного та електромагнітного полів в дрібномасштабні електромагнітні структури витікання поля за межі системи [14]. Деякі особливості таких процесів розглядаються нижче.

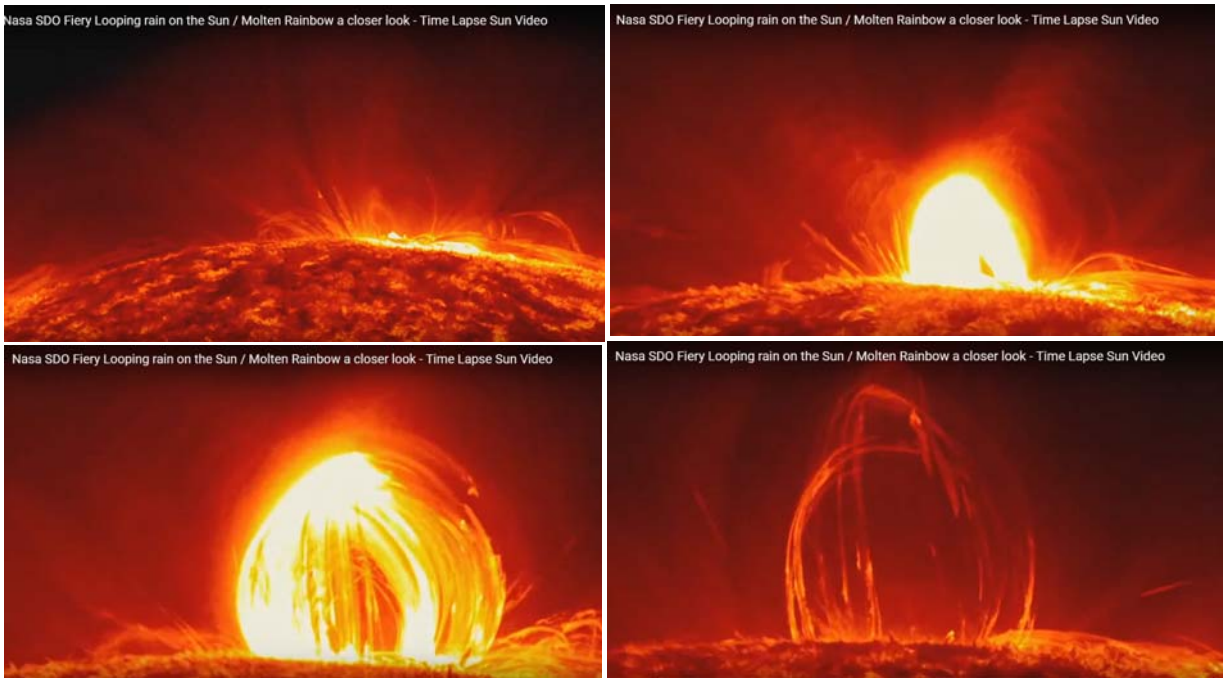


Рис. 5. Фрагменти відеозапису еволюції дисипативної польової структури руху на поверхні Сонця (19.07.2012 р., відеозапис NASA [43]). Коротка історія одного космічного життя

Вихор-хвильові інерційно-дисипативні структури руху. Надсвітлові джети.

Якщо відшукувати рішення системи (А-Г) у вигляді [14]:

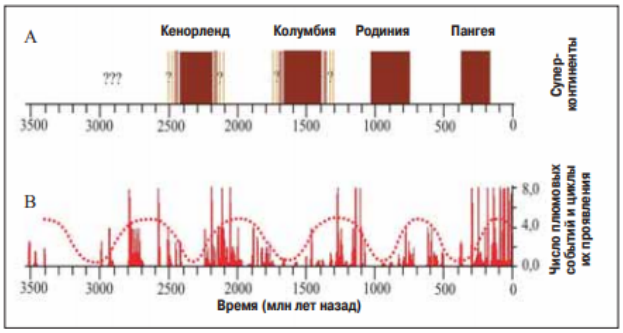
$$\vec{\mathrm{V}}\left(t,\vec{r}\right)=\vec{\mathrm{V}}_a\cdot e^{i\left(\omega t-\vec{k}\cdot\vec{r}\right)}, \tag{69}$$

де $\vec{\mathrm{V}}_a$ – комплексна амплітуда вектор-потенціалу поля, ω, $\vec{k}$ – циклічна частота і хвильовий вектор (взагалі кажучи, комплексні), $\vec{r}$ – радіус-вектор, то для гравітаційного і сильного полів у першому наближенні [14] слідують співвідношення:

$$\upsilon_{ph}=\pm i\cdot\frac{\omega}{k}, \tag{70}$$

де i – уявна одиниця, k – хвильове число.

В такому випадку дійсне значення фазової швидкості хвиль υ_{ph} можливе при суто уявному k (або ω), що вимагає дисипації енергії для утворення відповідних польових структур руху. Це ,зокрема, пояснює вищезгадане потужне електромагнітне випромінювання квазістепеневого спектру, яке генерується в космічних системах в процесах прямого каскаду. Іншим важливим прикладом є дисипаційні процеси в тілі Землі, що супроводжують утворення надглобальних гравітаційно-електромагнітно-гідродинамічних хвиль в системі Земля–Місяць [14] з періодами порядка 700–800 мільйонів років. Утворення таких колективних форм руху пояснює, зокрема, плюм-тектонічну та вулканічну активність земних надр, варіації теплового поля Землі, рух континентів та циклічність кліматичних змін – рис. 6. Для порівняння на рис. 7 показані відповідні довготривалі коливання в технічній контактній системі вал-втулка, що входить до складу машини тертя УМТ-2168 з електромагнітним приводом. Пасова (ремінна) передача від електродвигуна на машинний вал (рис. 7в) ,по суті, моделює «м'яку» гравітаційну контактну взаємодію в згаданій вище системі Земля-Місяць. Результати дисипаційних процесів в підповерхневих шарах втулки (рис. 7б) умовно відображають дисипаційні процеси в тілі Землі (рис. 6б).



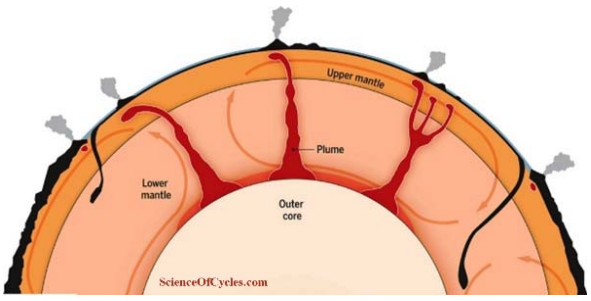


Рис. 6. Довготривала періодичність процесів глибинної геодинаміки [40] (зліва) та схема плюм-тектонічної і вулканічної активності земних надр (справа)

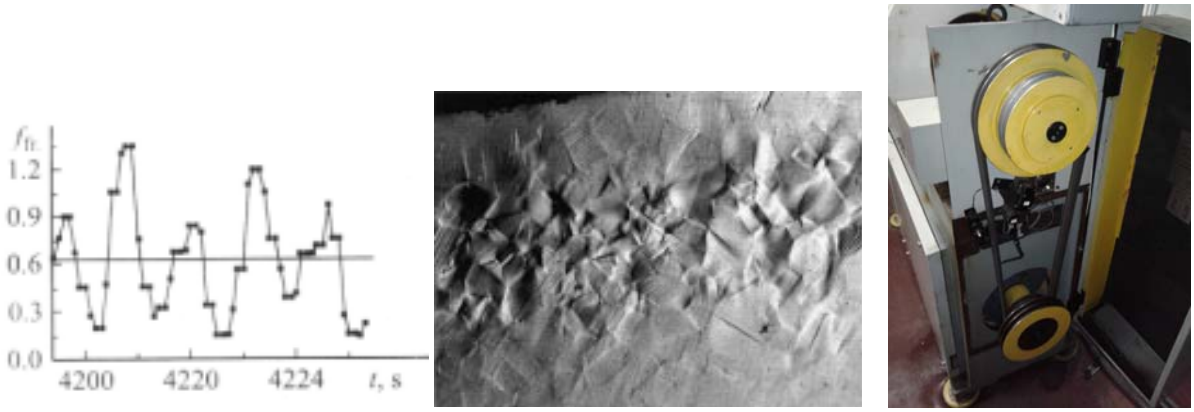


Рис. 7. Довготривалі коливання коефіцієнта тертя в технічній контактній системі типу вал-втулка [41] (зліва), результати дисипативних процесів в приповерхневих шарах втулки [41] (посередині) та фотографія ремінної передачі машини тертя УМТ-2168 (справа)

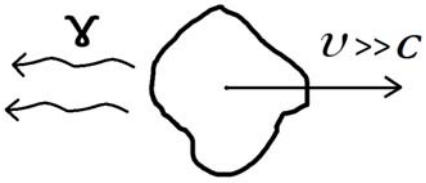


Рис. 8. Схема руху надсвітлових джетів

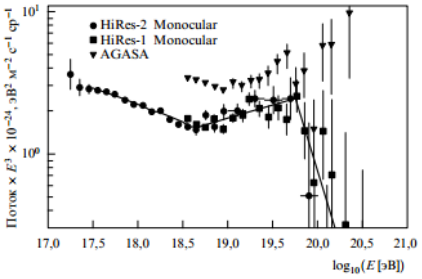


Рис. 9. Спектри космічних променів надвисоких енергій [38]

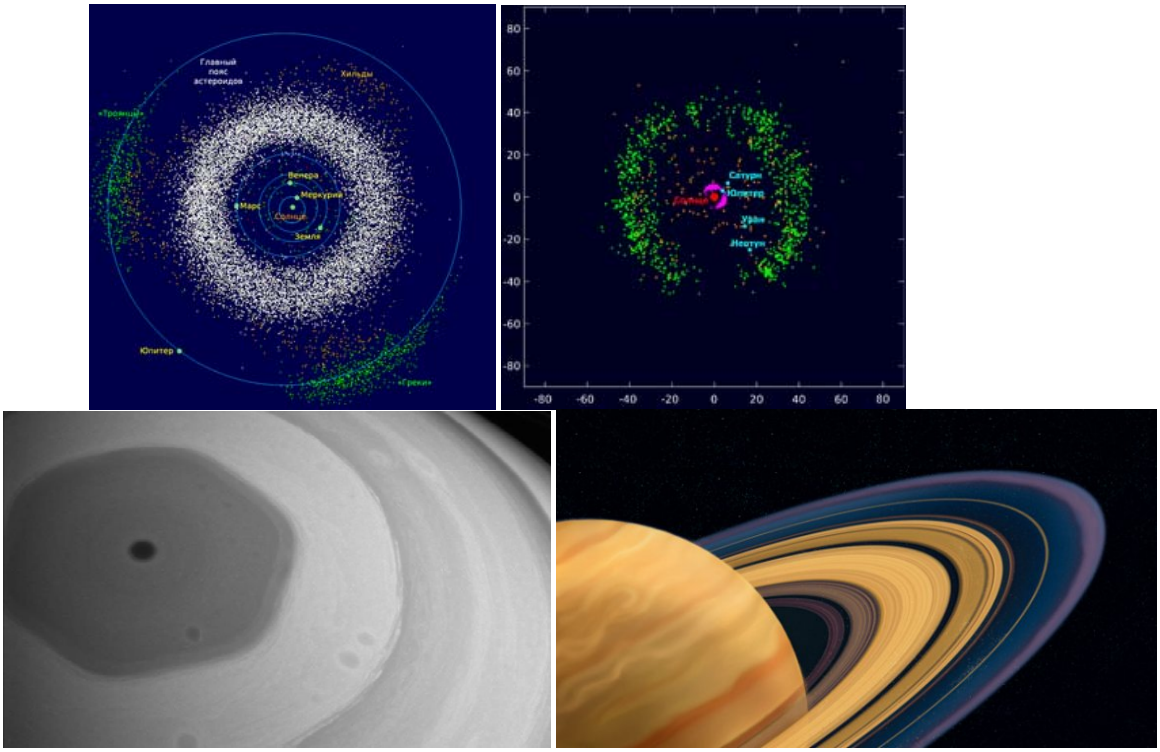


Рис. 10. «Заморожений хаос» у Сонячній системі: Головний пояс астероїдів, Сімейство Хільди та Троянці Юпітера (зліва вгорі), пояс Койпера (справа вгорі), Гексагон на Сатурні (зліва внизу), кільця Сатурна (справа внизу)

Найекзотичнішим видом дисипативних польових структур руху, з нашого погляду, є утворення надсвітлових джетів з сильного та електромагнітного полів, що реєструються у вигляді космічних променів надвисоких енергій [14]. Схема таких структур наведена на рис. 8. Зазначимо, що системи виду (Б-Г) не містять обмежень щодо $\vec{V}$ та відповідно – групової гідродинамічної швидкості $\vec{\upsilon}$ [14]. У випадку легких ядер (згустків сильного та електромагнітного поля), згенерованих механізмом контактного динамо в активних ядрах галактик, можливий такого роду реактивний рух структур з перемінною польовою масою, що поступово витрачається на зворотнє випромінювання γ -квантів. З подоланням світлового бар'єру таке

випромінювання буде вже не сповільнювати [17], а прискорювати згусток поля. Такий процес утворення космічних променів надвисоких енергій, звісно, виходить за межі не тільки ГЗК-обрізання спектру (рис. 9) [14, 38], але й за штучно нав'язані межі спеціальної теорії відносності Ейнштейна, створеної, як уже зазначалось, для точкових об'єктів. **Підсистеми набутого («замороженого») хаосу у космосі. Космохронологія**

Еволюція космічної системи, по суті, визначається динамікою параметра кооперативної в'язкості ν_{co}. Проводячи паралелі з живими системами, слід очікувати його підйому до стадії розквіту (чи-то збереження) з наступним спадом (старінням) та врешті – смертю. Остання формально відповідає мінімальному значенню $\nu_{co} = 0$, що повертає систему назад до хаосу (А) на початковій схемі. З рівняння (А) та теореми Томсона щодо збереження циркуляції швидкості слідує «вмороженість» завихореності вектор-потенціалу в матеріальне середовище [14]. Із врахуванням (69) з рівняння (А) отримуємо:

$$\omega = 0,\ T \to \infty,\ \vec{k} \cdot \vec{V} = 0 \qquad (71,72,73)$$

Умовно кажучи, «заморожене» поле $rot\vec{V}$, зберігаючи свою топологію, «впадає у вічність» : $T \to \infty$. Приклади такого «замороженого» хаосу неважко віднайти в нашій Сонячній системі – рис. 10. Всі ці структури не мають адекватного пояснення на сьогоднішній день. Як не дивно, цей структурований хаос є лишень особливим видом руху за інерцією, що безпосередньо слідує з рівняння (А) при заміні $\vec{V}$ на $\vec{\upsilon}$. Такий вид руху матеріального середовища за інерцією суттєво доповнює відомі рухи: рівномірний і прямолінійний, рівномірне обертання твердого тіла та регулярну прецесію за інерцією [36].

Вражаючим Метагалактичним аналогом тут виступає гіпотетичне [21, 37] периферійне гало Метагалактики, що знаходиться у тепловій рівновазі з відомим фоновим мікрохвильовим випромінюванням при температурі близько 2,7 °К. На відміну від стійких ілюзій, породжених Великим Вибухом, цей хаос ми вважаємо набутим, а не «реліктовим». Що ж до оцінок віку Всесвіту на основі тих же ілюзій [5, 6, 18], слід зауважити: не варто зводити акт творення до вибуху. Втім ,такого роду зауваження вносять елементи моралі в суто формальні рівняння поля, що нетипово для точних наук. Можливо, це і є та нова стара фізика.

Література

1. Тэйлор Дж.Х. Двойные пульсары и релятивистская гравитация (Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 1993) / Дж. Х. Тэйлор // УФН. – 1994. – Т. 164, № 7. – С. 757–764.
2. Халс Р.А. Открытие двойного пульсара (Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 1993) / Р.А. Халс // УФН. – 1994. – Т. 164, № 7. – С. 743–756.
3. Вильчек Ф.А. Асимптотическая свобода: от парадоксов к парадигмам (Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2004) / Ф.А.Вильчек // УФН. – 2005. – Т. 175, № 12. – С. 1325–1337.
4. Гросс Д.Дж. Открытие асимптотической свободы и появление КХД (Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2004) / Д.Дж. Гросс // УФН. – 2005. – Т. 175, № 12. – С. 1306–1318.
5. Шмидт Б.П. Ускоренное расширение Вселенной по наблюдениям далеких сверхновых (Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2011) / Б.П.Шмидт // УФН. – 2013. – Т. 183, № 10. – С. 1078–1089.
6. Рисс А.Дж. Мой путь к ускоряющейся Вселенной (Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2011) / Дж. А. Рисс // УФН. – 2013. – Т. 183, № 10. – С. 1090–1098.
7. The BEH-mechanism, Interactions with Short Range Forces and Scalar Particles. Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2013. URL: http://kva.se
8. The Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory and the First Direct Observation of Gravitational Waves. Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2017. URL: http://kva.se
9. Ланев А.В. Результаты коллаборации CMS: бозон Хиггса и поиски новой физики / А.В. Ланев // УФН. – 2014. – Т. 184, № 9. – С. 996–1004.
10. Козаков Д.И. Хиггсовский бозон открыт: что дальше? / Д.И. Козаков // УФН. – 2014. – Т. 184, № 9. – С. 1004–1016.
11. Новиков И.Д. Черные дыры, кротовые норы и машины времени / И.Д. Новиков // УФН. – 2016. – Т. 186, № 7. – С. 760–792.
12. Рябов В.А. Поиски частиц темной материи / В.А. Рябов, В.А. Царев, А.М. Цховребов // УФН. – 2008. – Т. 178, № 11. – С. 1129–1164.
13. Черепащук А.М. История истории Вселенной / А.М. Черепащук // УФН. – 2013. – Т. 183, № 5. – С. 535–556.
14. Заспа Ю.П. Контактне динамо як генератор когерентних (кооперативних) космічних форм руху та джерело планетарної, сонячної, галактичної та метагалактичної енергії та електромагнетизму. Частина VIII / Ю.П. Заспа // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 5. – С. 226–239.
15. Космогенез в китайской философии [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://ru.wikipedia.org/wiki/Космогенез_в_китайской_философии
16. Заспа Ю.П. Контактне динамо як генератор когерентних космічних форм руху та джерело планетарного, сонячного і галактичного магнетизму. Частина I / Ю.П. Заспа // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – № 5(229). – С. 106–118.

17. Ландау Л.Д. Теория поля / Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. – М. : Наука, 1988. – 512 с.

18. Физическая энциклопедия : в 5 т. / под. ред. А.М. Прохорова. – М. : Большая росс. энц., 1999. – 760 с.

19. Физика микромира. Маленькая энциклопедия / под ред. Д.В. Ширкова. – М. : Сов. Энц, 1980. – 528 с.

20. Ландау Л.Д. Электродинамика сплошных сред / Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. – М. : Наука, 1982. – 660 с.

21. Заспа Ю.П. Контактне динамо як генератор когерентних космічних форм руху та джерело планетарної, сонячної, галактичної та метагалактичної енергії та електромагнетизму. Частина VII / Ю.П. Заспа // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 3. – С. 212–221.

22. Моффатт К. Вихревая динамика: наследие Гельмгольца и Кельвина / К. Моффатт // Нелинейная динамика. – 2006. – Т. 2, № 4. – С. 401–410.

23. Moffatt H.K. Helicity in Laminar and Turbulent Flow / H.K. Moffatt, A. Tsinober // Annu. Rev. Fluid Mech. – 1992. – V. 24. – P. 281–312.

24. Берестецкий В.Б. Квантовая электродинамика / Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Питаевский А.П. – М. : Наука, 1989. – 728 с.

25. Гравитомагнетизм [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://ru.wikipedia.org/wiki/Гравитомагнетизм

26. Чернин А.Д. Темная энергия и всемирное антитяготение / А.Д. Чернин // УФН. – 2008. – Т. 178, № 3. – С. 267–300.

27. Лукаш В.Н.Темная энергия: мифы и реальность / В.Н. Лукаш, В.А. Рубаков // УФН. – 2008. – Т. 178, № 3. – С. 301–308.

28. Кузьменко Д.С. Вакуум, конфайнмент и струны КХД в методе вакуумных корреляторов / Д.С. Кузьменко, Ю.А. Симонов, В.И. Шевченко // УФН. – 2004. – Т. 174, № 1. – С. 3–18.

29. Райзен И.И. Деконфайнмент цвета и субадронное вещество: фазовые состояния и роль конституентных кварков / И.И. Райзен, Е.Л. Фейнберг, О.Д. Чернавская // УФН. – 2004. – Т. 174, № 5. – С. 473–493.

30. Дремин И.М. Кварк-глюонная среда / И.М. Дремин, А.В. Леонидов // УФН. – 2010. – Т. 180, № 11. – С. 1167–1196.

31. Abbott B.P. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger / B.P. Abbott et.al. // Phys. Review Letters. – 2016. – V. 116, N061102. – P. 1–16.

32. Заспа Ю.П. Контактне динамо як генератор когерентних космічних форм руху та джерело планетарної, сонячної і галактичної і метагалактичної енергії. Частина IV / Ю.П. Заспа // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2016. – № 3. – С. 115–128.

33. Темная материя оказалась более «гладкой», чем считали ученые [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://ria.ru/science/20161207/1483035197.html?inj=1

34. Астрономы впервые получили фотографии «нитей» темной материи [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://ria.ru/science/20170412/1492120025.html

35. Засов А.В. Темная материя в галактиках / А.В. Засов, А.С. Сабурова, А.В. Хоперсков, С.А. Хоперсков // УФН. – 2017. – Т.187, № 1. – С. 3–44.

36. Никитин Н.Н. Курс теоретической механики / Никитин Н.Н. – М. : Высш. школа, 1990. – 607 с.

37. Заспа Ю.П. Контактне динамо як генератор когерентних космічних форм руху та джерело планетарного, сонячного , галактичного і метагалактичного магнетизму. Частина II / Ю.П. Заспа // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2016. – № 2. – С. 36–52.

38. Филоненко А.Д. Радиоастрономический метод измерения потоков космических частиц сверхвысокой энергии / А.Д. Филоненко // УФН. – 2012. – Т. 182, № 8. – С. 793–827.

39. Synoptic Magnetogram of the Radial Component of the Solar Surface Magnetic Field. URL: http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/magbfly.jpg

40. Кузьмин М. Глубинная геодинамика – основной механизм развития Земли / М. Кузьмин, В. Ярмолюк, В. Кравчинский // Наука в России. – 2013. – № 6 (198). – С. 10–19.

41. Колубаев А.В. Генерация звука при трении скольжения / Колубаев А.В., Колубаев Е.А., Вагин И.Н., Сизова О.В. // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31, № 19. – С. 6–13.

42. Ледниковый период [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://ru.wikipedia. org/wiki/Ледниковый_период

43. NASA SDO Fiery Looping rain on the Sun. URL: https://youtu.be/zlZoQ8aGdn0

References

1. Teylor Dzh.H. Dvoynyie pulsaryi i relyativistskaya gravitatsiya (Nobelevskaya lektsiya. Stokgolm, 8 dekabrya 1993) / Dzh. H. Teylor // UFN. – 1994. – T. 164, 7. – S. 757–764.

2. Hals R.A. Otkryitie dvoynogo pulsara (Nobelevskaya lektsiya. Stokgolm, 8 dekabrya 1993) / R.A. Hals // UFN. – 1994. – T. 164, 7. – S. 743–756.

3. Vilchek F.A. Asimptoticheskaya svoboda: ot paradoksov k paradigmam (Nobelevskaya lektsiya. Stokgolm, 8 dekabrya 2004) / F.A.Vilchek // UFN. – 2005. – T. 175, 12. – S. 1325–1337.

4. Gross D.Dzh. Otkryitie asimptoticheskoy svobodyi i poyavlenie KHD (Nobelevskaya lektsiya. Stokgolm, 8 dekabrya 2004) / D.Dzh. Gross // UFN. – 2005. – T. 175, 12. – S. 1306–1318.

5. Shmidt B.P. Uskorennoe rasshirenie Vselennoy po nablyudeniyam dalekih sverhnovyih (Nobelevskaya lektsiya. Stokgolm, 8 dekabrya 2011) / B.P.Shmidt // UFN. – 2013. – T. 183, 10. – S. 1078–1089.

6. Riss A.Dzh. Moy put k uskoryayuscheysya Vselennoy (Nobelevskaya lektsiya. Stokgolm, 8 dekabrya 2011) / Dzh. A. Riss // UFN. – 2013. – T. 183, 10. – S. 1090–1098.

7. The BEH-mechanism, Interactions with Short Range Forces and Scalar Particles. Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2013. URL: http://kva.se

8. The Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory and the First Direct Observation of Gravitational Waves. Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2017. URL: http://kva.se

9. Lanev A.V. Rezultatyi kollaboratsii CMS: bozon Higgsa i poiski novoy fiziki / A.V. Lanev // UFN. – 2014. – T. 184, 9. – S. 996–1004.

10. Kozakov D.I. Higgsovskiy bozon otkryit: chto dalshe? / D.I. Kozakov // UFN. – 2014. – T. 184, 9. – S. 1004–1016.

11. Novikov I.D. Chernyie dyiryi, krotovyie noryi i mashinyi vremeni / I.D. Novikov // UFN. – 2016. – T. 186, # 7. – S. 760–792.

12. Ryabov V.A. Poiski chastits temnoy materii / V.A. Ryabov, V.A. Tsarev, A.M. Tshovrebov // UFN. – 2008. – T. 178, 11. – S. 1129–1164.

13. Cherepaschuk A.M. Istoriya istorii Vselennoy / A.M. Cherepaschuk // UFN. – 2013. – T. 183, 5. – S. 535–556.

14. Zaspa Yu.P. Kontaktne dynamo yak henerator koherentnykh (kooperatyvnykh) kosmichnykh form rukhu ta dzherelo planetarnoi, soniachnoi, halaktychnoi ta metahalaktychnoi enerhii ta elektromahnetyzmu. Chastyna VIII / Yu.P. Zaspa // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2017. – 5. – S. .

15. Kosmohenez v kytaiskoi fylosofyy [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : https://ru.wikipedia.org/wiki/Kosmohenez_v_kytaiskoi_fylosofyy

16. Zaspa Yu.P. Kontaktne dynamo yak henerator koherentnykh kosmichnykh form rukhu ta dzherelo planetarnoho, soniachnoho i halaktychnoho mahnetyzmu. Chastyna I / Yu.P. Zaspa // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2015. – 5(229). – S. 106–118.

17. Landau L.D. Teoriya polya / Landau L.D., Lifshits E.M. – M. : Nauka, 1988. – 512 s.

18. Fizicheskaya entsiklopediya : v 5 t. / pod. red. A.M. Prohorova. – M. : Bolshaya ross. ents., 1999. – 760 s.

19. Fizika mikromira. Malenkaya entsiklopediya / pod red. D.V. Shirkova. – M. : Sov. Ents, 1980. – 528 s.

20. Landau L.D. Elektrodinamika sploshnyih sred / Landau L.D., Lifshits E.M. – M. : Nauka, 1982. – 660 s.

21. Zaspa Yu.P. Kontaktne dynamo yak henerator koherentnykh kosmichnykh form rukhu ta dzherelo planetarnoi, soniachnoi, halaktychnoi ta metahalaktychnoi enerhii ta elektromahnetyzmu. Chastyna VII / Yu.P. Zaspa // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2017. – 3. – S. 212–221.

22. Moffatt K. Vykhrevaia dynamyka: nasledye Helmholtsa y Kelvyna / K. Moffatt // Nelyneinaia dynamyka. – 2006. – T. 2, 4. – S. 401–410.

23. Moffatt H.K. Helicity in Laminar and Turbulent Flow / H.K. Moffatt, A. Tsinober // Annu. Rev. Fluid Mech. – 1992. – V. 24. – P. 281–312.

24. Berestetskiy V.B. Kvantovaya elektrodinamika / Berestetskiy V.B., Lifshits E.M., Pitaevskiy A.P. – M. : Nauka, 1989. – 728 s.

25. Gravitomagnetizm [Elektronniy resurs]. – Rezhim dostupu : https://ru.wikipedia.org/wiki/Gravitomagnetizm

26. Chernin A.D. Temnaya energiya i vsemirnoe antityagotenie / A.D. Chernin // UFN. – 2008. – T. 178, 3. – S. 267–300.

27. Lukash V.N.Temnaya energiya: mifyi i realnost / V.N. Lukash, V.A. Rubakov // UFN. – 2008. – T. 178, 3. – S. 301–308.

28. Kuzmenko D.S. Vakuum, konfaynment i strunyi KHD v metode vakuumnyih korrelyatorov / D.S. Kuzmenko, Yu.A. Simonov, V.I. Shevchenko // UFN. – 2004. – T. 174, 1. – S. 3–18.

29. Rayzen I.I. Dekonfaynment tsveta i subadronnoe veschestvo: fazovyie sostoyaniya i rol konstituentnyih kvarkov / I.I. Rayzen, E.L. Feynberg, O.D. Chernavskaya // UFN. – 2004. – T. 174, 5. – S. 473–493.

30. Dremin I.M. Kvark-glyuonnaya sreda / I.M. Dremin, A.V. Leonidov // UFN. – 2010. – T. 180, 11. – S. 1167–1196.

31. Abbott B.P. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger / B.P. Abbott et.al. // Phys. Review Letters. – 2016. – V. 116, N 061102. – P. 1–16.

32. Zaspa Yu.P. Kontaktne dynamo yak henerator koherentnykh kosmichnykh form rukhu ta dzherelo planetarnoho, soniachnoho i halaktychnoi i metahalaktychnoi enerhii. Chastyna IV / Yu.P. Zaspa // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2016. – 3. – S. 115–128.

33. Temnaya materiya okazalas bolee «gladkoy», chem schitali uchenyie [Elektronniy resurs]. – Rezhim dostupu : https://ria.ru/science/20161207/1483035197.html?inj=1

34. Astronomyi vpervyie poluchili fotografii «nitey» temnoy materii [Elektronniy resurs]. – Rezhim dostupu : https://ria.ru/science/20170412/1492120025.html

35. Zasov A.V. Temnaya materiya v galaktikah / A.V. Zasov, A.S. Saburova, A.V. Hoperskov, S.A. Hoperskov // UFN. – 2017. – T.187, 1. – S. 3–44.

36. Nikitin N.N. Kurs teoreticheskoy mehaniki / Nikitin N.N. – M. : Vyissh. shkola, 1990. – 607 s.

37. Zaspa Yu.P. Kontaktne dynamo yak henerator koherentnykh kosmichnykh form rukhu ta dzherelo planetarnoho, soniachnoho i halaktychnoho i metahalaktychnoho mahnetyzmu. Chastyna II / Yu.P. Zaspa // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2016. – 2. – S. 36–52.

38. Fylonenko A.D. Radyoastronomycheskyi metod yzmerenyia potokov kosmycheskykh chastyts sverkhvysokoi enerhyy / A.D. Fylonenko // UFN. – 2012. – T. 182, 8. – S. 793–827.

39. Synoptic Magnetogram of the Radial Component of the Solar Surface Magnetic Field. URL: http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/magbfly.jpg

40. Kuzmyn M. Hlubynnaia heodynamyka – osnovnoi mekhanyzm razvytyia Zemly / M. Kuzmyn, V. Yarmoliuk, V. Kravchynskyi // Nauka v Rossyy. – 2013. – 6 (198). – S. 10–19.

41. Kolubaev A.V. Heneratsyia zvuka pry trenyy skolzhenyia / Kolubaev A.V., Kolubaev E.A., Vagyn Y.N., Syzova O.V. // Pysma v ZhTF. – 2005. – T. 31, 19. – S. 6–13.

42. Lednykovyi peryod [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : https://ru.wikipedia. org/wiki/Lednykovyi_peryod

43. NASA SDO Fiery Looping rain on the Sun. URL: https://youtu.be/zlZoQ8aGdn0

Рецензія/Peer review : 06.11.2017 р. Надрукована/Printed :12.12.2017 р.

УДК [(339.13(510 : (477) : 622 -34): (006.022 : 005.334 – 047.52) (045)]

В.В. ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ
Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського, м. Кривий Ріг

УСУНЕННЯ НЕВІДПОВІДНОСТЕЙ З ВОЛОГОЮ ЗАЛІЗОРУДНОГО КОНЦЕНТРАТУ ПІД ЧАС ТОРГІВЛІ З КИТАЄМ

Метою даної статті є усунення невідповідностей з вологою залізорудного концентрату при торгівлі з Китаєм. Визначення методів, які забезпечують вимоги металургійних підприємств до вихідної сировини як на внутрішньому, так і зовнішньому ринку. В процесі вирішення проблеми використано загальні й спеціальні наукові методи дослідження економічних процесів, а саме: узагальнення та абстрагування, порівняння, аналізу і синтезу, логічний метод, історичний метод, діалектичний метод. Торгівля між підприємствами сировиною супроводжуються невідповідностями, що і сталося при торгівлі залізорудним концентратом, який постачають до Китаю. Вміст вологи в українській продукції не відповідає вимогам китайських металургів. За таких умов гірничо-збагачувальні комбінати несуть значні збитки при розрахунках. Запропонований метод сушки залізорудного концентрату на прикладі ПАТ «Інгулецький гірничо-збагачувальний комбінат» дозволить скоротити вологу даної продукції з 10% до 7%, уникнути щорічних збитків на суму 36,9 млн дол. США, успішно вести торгівлю з Китаєм.

Ключові слова: *торгівля, залізорудний концентрат, волога в концентраті, збитки, сушка концентрату.*

V.V. DOBROVOLSKIY
Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhailo Tugan-Baranovsky, Kryvyi Rih

THE ELIMINATION OF DISCREPANCIES WITH THE MOISTURE OF IRON ORE CONCENTRATE IN TRADE WITH CHINA

The purpose of this article is to eliminate inconsistencies with the moisture of iron ore concentrate in trade with China. Defining methods that provide the demands of metallurgical enterprises for raw materials in both domestic and foreign markets. In the process of resolving the problem, general and special methods of studying economic processes, namely generalization and abstraction, comparison, analysis and synthesis, a logical method, a historical method are used. ***Objective.*** *The purpose of this article is to eliminate inconsistencies with the moisture of iron ore concentrate in trade with China. Defining methods that provide the demands of metallurgical enterprises for raw materials in both domestic and foreign markets.* ***Scientific novelty.*** *First formed methods of correction of non-compliance of domestic standards with the moisture of iron ore concentrate to the standards of China with which the trade is conducted. Offered the most optimal variant of drying the concentrate press filter which will allow to fulfill the conditions of trade and avoid loss in the transactions between partners. First formed methods of correction of non-compliance of domestic standards with the moisture of iron ore concentrate to the standards of China with which the trade is conducted. Offered the most optimal variant of drying the concentrate press filter which will allow to fulfill the conditions of trade and avoid loss in the transactions between partners. Trade between enterprises in raw materials could be accompanied by a variety of inconsistencies that happened in the trade of iron ore concentrate which is put to China. The moisture content of Ukrainian products do not meet the requirements of Chinese metallurgy. This mountain plants bear substantial losses in the calculations. The proposed method for shrinkage of iron ore concentrate on the example of PJSC "Inguletsky mining plant" will allow to reduce the moisture in this product from 10% to 7%, avoid annual losses of $ 36.9 million dollars and successfully conduct trade with China.*

Keywords: trade, iron ore concentrate, concentrate moisture loss, drying of the concentrate.

Постановка проблеми. Відомо, що на збагачувальних фабриках широко застосовуються процеси, що здійснюються у водних середовищах (збагачення у важких суспензіях, флотація та ін.), в ході яких у залізорудний концентрат вводиться значна кількість баласту – вода. Так, заключними операціями у процесах збагачення є механічне і термічне зневоднення продуктів збагачення, передусім – залізорудних концентратів.

Вітчизняними стандартами на виробництво залізорудного концентрату передбачена базова вологість цієї продукції – 10%. Зауважимо, що стандарти діють на внутрішньому ринку України. Проте металургійні підприємства Китаю, які закуповують 12,3 млн т концентрату за рік в Україні вимагають, щоб вміст води даної продукції становив не більше 6–7%. Отже, виникла невідповідність вітчизняних стандартів на залізорудний концентрат стандартам країни – імпортера Китаю.

Ціна залізорудного концентрату, за умови його транспортування споживачеві, становить 150$ за 1 т, тому збагачувальним комбінатам, крім того, що їм не зараховують концентрат за перевищення вологи в кількості 369 тис. т (12. 3 млн т х 0,03), несуть збитки за транспортування води на суму 36,9 млн дол. США (369 тис. т х 100 дол./т), де логістичні витрати на 1 т складають 100$.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Певний внесок у дослідження проблем, пов'язаних зі зниженням вологи у залізорудному концентраті, зробили такі відомі науковці, а саме: Култубаєв І. М., Садаков. В. Х., Третяк Б. А., Козирь А. В. [1], які досліджували вплив реагентів на вологість концентрату при вакуумній фільтрації. Ю. І. Тетеря, І. Н. Бобришова [2] вивчали можливості зниження вологості залізорудного концентрату в умовах Полтавського ГЗК. Способи сушіння тонкомеленого залізорудного концентрату висвітлені в авторських свідченнях російських науковців: Напольских С. А., Гельбинга Р. А., Сухарева А. Г. [3] та Цветкова М. А. [4]. Найбільших досягнень в даному напрямі здобули на гірничо-збагачувальному підприємстві Northland Resources – Каунісваара, Швеція [6]. Завдяки застосуванню прес-фільтрів моделі VPA 2040-54 задекларована волога в концентраті 6%, а фактично знаходиться в межах 6,5–7,0%.

Варто зазначити, що незважаючи на певний інтерес науковців до проблеми зниження вологи в

залізорудному концентраті, проблема залишається недостатньо вивченою сферою виробничої діяльності, про що свідчать виявлені невідповідності при торгівлі з Китаєм. Це обумовило появу вимог до вихідної сировини і у вітчизняних металургів, адже значний вміст гідратної вологи у залізорудному концентраті суттєво погіршує його якісні характеристик.

Так, перед вітчизняними збагачувальниками постає проблема вибору адекватних методів зниження вологи концентрату для забезпечення ефективної торгівлі цією продукцією.

Мета статті полягає в практичному осмисленні того, що гідратна волога, яка міститься у залізорудному концентраті, помітно знижує ефективність наступних металургійних переділів і ускладнює їх здійснення, тому значний вміст гідратної вологи у залізорудному концентраті обумовлює суттєве погіршення його якісних характеристик. Отже, необхідно винайти практичні методи зниження вологи у залізорудному концентраті для усунення невідповідностей при торгівлі з Китаєм

Виклад основного матеріалу дослідження. Однією з основних проблем на гірничо-збагачувальних комбінатах групи Метінвест є проблема високого вмісту вологи (>10%) у виробленому концентраті. Критичний вміст вологи для здійснення безпечного морського транспортування становить 9%. Відповідно при волозі 10% і більше Метінвест несе додаткові витрати і ризики неможливості відвантажити концентрат в Китай.

Постала гостра проблема високої вологи перед ПАТ «Інгулецьким ГЗК», який спеціалізується на виробництві концентрату. Існують випадки відмови від перевезення вантажу і відвантаженні судна в порту. Проблема високої вологи обумовлена наступними основними факторами:

– висока дрібність концентрату (технологічна і геологічна особливість);

– високий рівень фізичного зносу застосованої технології вакуумної фільтрації (середній вік фільтрів наближається до 20-и років при нормативному 12 років);

– проблеми з охолодженням вакуум-насосів в теплу пору року, коли волога наближається до 12% (ПАТ «ІнГЗК»).

При складанні технічного завдання зроблено такі припущення: всередині групи використовується, передусім, концентрат ПАТ «ІнГЗК» і ПАТ «ПівнГЗК»; при дефіциті − ПАТ «ЦГЗК»; всередині групи, передусім, застосовується високоякісний концентрат; обсяги поставок контрагентам в Україні планувалися на основі бізнес- плану 2016 року і прогнозу попиту. Поставки здійснюються, передовсім, з ПАТ «ІнГЗК», ПАТ «ПівнГЗК»; при дефіциті – ПАТ «ЦГЗК», ВАТ «ПівдГЗК». До моменту запуску в роботу комплексу щодо зниження вологи передбачається експортувати морем тільки концентрат ВАТ «ПівдГЗК». В умовах гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК) Криворіжжя зниження вологи в концентраті можливо досягти шляхом використання технологій: прес-фільтрація і сушіння в порту.

Порівняльний аналіз 2-х технологій наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Переваги та недоліки технологій зниження вологи ($/т)

Показник	Технології	
	Прес-фільтрація	Сушіння в порту
1	2	3
Мінімально можлива кінцева волога	6−7%	2%
Скорочення витрат на фрахт через велику безпеку вантажу	0,5 $/т	3 $/т
Зниження витрат на логістику	1,8 $/т	3,0 $/т
Собівартість переділу на ГЗК	Знижується на 0,6 $ / т	Збільшується на 3,6 $/т
Загальне зниження витрат	2,4 $/т	3,0 $/т
Інфраструктура	Обов'язкове будівництво нового корпусу фільтрації	Додатковий комплекс з виробництва ПВП, додаткові витрати щодо пилопригнічення, реконструкція вагових на відвантаження.
Логістичні та екологічні ризики	Проблеми з розвантаженням змерзлих вантажів в зимовий період знижуються, але не виключаються повністю	Збільшення пилопригнічення просипів через зниження вологи до 2%. Будуть потрібні додаткові витрати на підготовку вагонів. Збільшення витрат на кожен 1% втрат при транспортуванні складе 0,35 $/т. З досвіду ПАТ «ЛебГЗК» необхідно використовувати вагони з правильною геометрією− без щілин (не пошкоджені грейферним розвантаженням).
Інвестиції	40,5 млн $	46,5 млн $

Джерело: складено автором на основі [5].

Показники ефективності варіантів технологій (сушіння, прес-фільтрація) близькі. Але у варіанті сушіння не враховано додаткові заходи для зниження розпилу та просипу. Також існує ризик, який стосується розміру позитивного ефект-проекту, що ґрунтується на припущенні про зниження вартості фрахту на 3 $/т.

Найбільш ефективною технологією для комбінатів (забезпечення вологи в порту нижче 9%) є прес-фільтрація, де крім інших переваг, відсутні екологічні недоліки

Так, із запропонованих технологій зниження вологи, необхідно обрати варіант з прес-фільтрацією концентрату, який задовольняє вимоги щодо вологості < 7 %, та відмовитися від варіанту сушіння його в порту. що дозволить отримати залежність відображену на рис. 1.

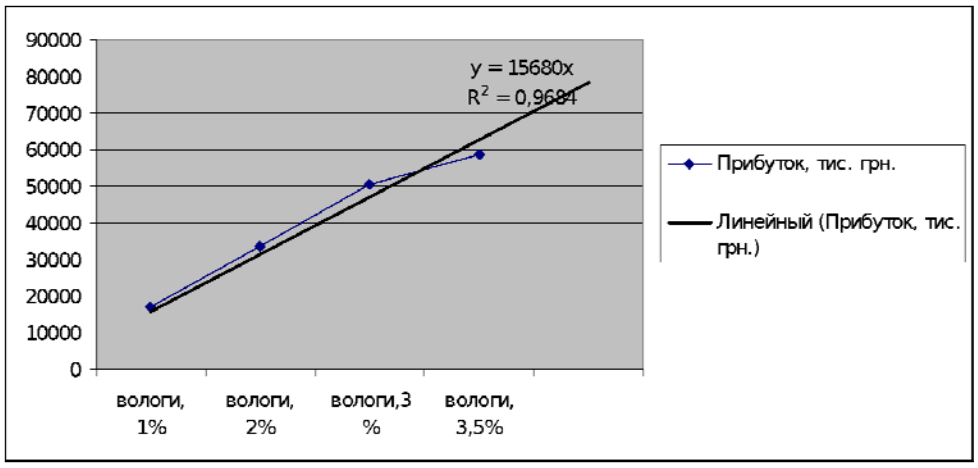


Рис. 1. Вплив скорочення вологи на прибуток ПАТ «ІнГЗК» від торгівлі залізорудним концентратом з Китаєм

Джерело:складено автором на основі [5].

Для продовження реалізації проекту необхідно вибрати місце розміщення майданчика. Розглянуто різні варіанти технології зниження вологи на різних майданчиках. Проведено випробування на лабораторних установках різних постачальників технології прес-фільтрації для визначення реальних можливостей устаткування при кінцевій волозі для концентратів ПАТ «ІнГЗК» і ВАТ «ПівдГЗК».

З метою підтвердження можливостей обладнання прес-фільтрації в умовах ПАТ «ІнГЗК» і ВАТ «ПівдГЗК» кінцевої вологи 6%, замовлених компаніями-виробниками у вересні 2016р., фахівцями підприємств проведено лабораторні випробування на устаткуванні трьох претендентів: Diemme, Metso. Outotec (табл. 2).

Таблиця 2

Результати випробувань отримані на поточний момент (%)

Виробники концентрату	Diemme	Metso	Outotec
РЗФ* -1 ІнГЗК	7,5%±0,5%	7,0%	6−7%
РЗФ-2 ІнГзК	7,0%±0,5%	5,8−6,8%	6−7%
РЗФ-1 ПівдГЗК	6,5%±0,5%	–	–
РЗФ-2 ПівдГЗК	6,5%±0,5%	–	–

Джерело: складено автором на основі [5].

Примітки:

* – рудозбагачувальна фабрика.

Всі постачальники розраховували свої техніко-комерційні пропозиції на отримання кінцевої вологи в концентраті в межах 6−7%. Результат у 6%, за визначенням постачальників, можливо буде досягти при промисловій експлуатації обладнання тільки в окремих випадках, та гарантувати постійного досягнення цього показника вони не зможуть.

Проектом запропоновано, що кінцева волога із застосуванням технології прес-фільтрації складе 6−7%. При розрахунках ефективності використовуємо значення 7% (як мінімально стабільний гарантований показник у промисловому виробництві). Така вологість є достатньою для безпечного транспортування вантажів морським транспортом (< 9% при завантаженні на судно).

Найбільш ефективним є варіант установки прес-фільтрації на ПАТ «ІнГЗК» при відвантаженні концентрату морем, але і при реалізації його на внутрішньому ринку ефективність залишається досить високою. До моменту запуску в роботу комплексу щодо зниження вологи передбачається експортувати

морем тільки концентрат ВАТ «ПівдГЗК» На долю ПАТ «ІнГЗК» припадають такі об'єми продажу концентрату (табл. 3).

Таблиця 3

Об'єми продажу концентрату (А-1, А-2) згідно з технологічною стратегією (ТС) групи «Метінвест», які припадають на ПАТ «ІнГЗК» (рік, млн т)

Рік	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Об'єми	3	3	3	6	6	6	6	6	6

Джерело: складено автором на основі [5].

Місце розміщення майданчика ПАТ «ІнГЗК»:

− РЗФ-1 (концентрат ММС 65% заліза);

− РЗФ-2 (концентрат МФД 67% заліза).

Проект реалізується на ПАТ «ІнГЗК» силами підприємства. Оптимальний обсяг ЗРК: 1 етап − концентрат ММС , ПАТ «ІнГЗК». Обсяг виробництва − 3 млн т.

Термін запуску − IV квартал 2017 року (табл. 4).

Таблиця 4

Показники ефективності проекту: для відвантаження до Китаю

Інвестиції.	NPV	IRR,	DPP
162400 тис. грн	172800 тис. грн	43 %	6 років

Джерело: складено автором на основі [5].

Таким чином, запропоновано такі рішення проблеми:

1. Затвердити до розгляду в ТЕО варіант із застосуванням технології прес-фільтрації та розміщення на РЗФ-1, ПАТ «ІнГЗК» з обсягами виробництва 3 млн т. Проектування виконати для 6 млн т з поділом на 2 пускові комплекси.

2. Визначити в окремий проект напрям щодо скорочення собівартості застосування технології прес-фільтрації на РЗФ-2 концентрат МФД ПАТ «ІнГЗК».

Висновки. Отже, на основі проведених досліджень, на прикладі ПАТ «Інгулецький гірничо-збагачувальний комбінат», встановлено, що сучасний кількісний склад залізорудного концентрату по вологі не відповідає вимогам торгівлі з Китаєм. Застарілі технології збагачення залізної руди дозволяють виготовляти концентрат з вологою 10% і більше. У зв'язку з цим проаналізовано всі дійсні вітчизняні і зарубіжні методи зниження вологи в концентраті. Найбільш придатними для впровадження в умовах ПАТ «ІнГЗК» стали дві технології зниження вологи:

1. Сушіння в порту.
2. Прес-фільтрація.

Показники ефективності варіантів технологій (сушка в порту і прес-фільтрація) близькі, але у варіанті сушіння не враховано додаткові заходи для зниження пилення і просипу. Також існує ризик стосується розміру позитивного ефект-проекту, який ґрунтується на припущенні про зниження вартості фрахту на 3 $/т.

Таким чином, найбільш ефективною технологією для наших умов (забезпечення вологи в порту нижче 9%) є прес-фільтрація.

Так, із запропонованих технологій зниження вологи необхідно обрати варіант з прес-фільтрацією концентрату, який задовольняє вимоги щодо вологості <7%, а також, визначимо, що необхідно відмовитися від варіанту сушіння його в порту.

Література

1. Култубаев И. М. Исследование влияния реагентов на влажность железорудного концентрата при вакумной фыльтрации / И. М. Култубаев, В. Х. Садаков, Б. А. Третяк, А.В. Козирь. – Магнитлогорск : Весник МГТУ им. Г.И. Носова, 2008. – № 3. – С. 15–18.

2. Тетеря Ю. І. Дослідження можливості зниження вологості залізорудного концентрату в умовах Полтавського ГЗК / Ю. І. Тетеря, І. Н. Бобришова // Вісник НГУ. – 2012. – № 5. – С. 37–41.

3. Авторское свидетельство № 1679162, кл. F27B 7/36. Способ сушки тонкоизмельченного железорудного концентрата / Напольских С. А., Гельбинг Р. А., Сухарев А. Г. – опубл. 23.09.91, бюл. № 35. – С. 1−5.

4. Авторское свидетельство SU 1326623 A1. Способ сушки тонкоизмельченного железорудного концентрата / Цветков М. А. – опубл. 30.07.1987. – С.14.

5. Животов А. И. Проект «Снижение влаги в товарном железорудном концентрате». Анализ альтернатив реализации проекта / Животов А. И. / ООО «МЕТИНВЕСТ ХОЛДИНГ». – Кривой Рог, 2016. – 30 с.

6. Отчет о посещении предприятия Northland Resources – проект Каунисваара, Швеция / ООО

«МЕТИНВЕСТ ХОЛДИНГ». – Кривой Рог, 2016. – 24 с.

References

1. Koltupayev, I. (2008). Issledovaniye vliyaniya reagentov na vlagnost gelezorudnogo koncentrata pri vakuumnoy filtracii [Study of the effect of reagents on the moisture content of iron ore concentrate under vacuum filtration], Magnitogorsk, Vesnik MGTU, № 3, P.15-18.

2. Teteria, Yu. (2012). Doslidzhennia mozhlyvostei znyzhennia volohosti zalizorudnoho kontsentratu v umovakh Poltavskoho HZK [Study the possibility of reducing moisture content of iron ore concentrate in the conditions of Poltava mining plant], Dnipropetrovsk, Visnyk NGU, № 3, P.37-41

3. Napolskih, S. (1991). Sposob sushki tonkoizmelchonnogo gelezorudnogo kontsentrata [Method of drying fine iron ore concentrate], The copyright certificate. No. 1679162, CL F27B 7/36, publ. 23.09.91, bull. No. 35, P. 1-5

4. Tsvetkov, M. (1987). Sposob sushki tonkoizmelchonnogo gelezorudnogo koncentrata [Method of drying fine iron ore concentrate], Author's certificate SU 1326623 A1, publ. 30.07.1987. – P. 1-4.

5. Givotov, A. (2016). Proekt “Snigeniye vlagi v tovarnom gelezorudnom concentrate” Analyz alternative realizacii proekta [The project "Reduction of moisture in marketable iron ore concentrate" Analysis of alternatives for project implementation], Krivoy Rog, 30p.

6. Report on visit to Northland Resources project Kaunisvaara, Sweden //– LLC "METINVEST HOLDING" - Krivoy Rog, 2016, – p. 24.

Рецензія/Peer review : 07.11.2017 р. Надрукована/Printed :02.12.2017 р.

За зміст повідомлень редакція відповідальності не несе

Повні вимоги до оформлення рукопису
http://vestnik.ho.com.ua/rules/

Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету, протокол протокол № 6 від 29.11.2017 р.

Підп. до друку 05.12.2017 р. Ум.друк.арк. 38,97 Обл.-вид.арк. 37,25
Формат 30х42/4, папір офсетний. Друк різографією.
Наклад 100, зам. № _____

Тиражування здійснено з оригінал-макету, виготовленого
редакцією журналу “Вісник Хмельницького національного університету”
редакційно-видавничим центром Хмельницького національного університету
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1. тел (0382) 72-83-63