

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

КРЕПИЧ СВІТЛАНА ЯРОСЛАВІВНА

УДК 519.688

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ  
ПРИДАТНОСТІ СТАТИЧНИХ СИСТЕМ МЕТОДАМИ АНАЛІЗУ  
ІНТЕРВАЛЬНИХ ДАНИХ

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник:

Стахів Петро Григорович,

доктор технічних наук, професор

Тернопіль – 2016

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ЗАДАЧІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ПРИДАТНОСТІ СТАТИЧНИХ СИСТЕМ	14
1.1. Особливості статичних систем та їх найважливіша характеристика функціональна придатність	15
1.2. Постановка задачі аналізу функціональної придатності статичних систем та особливості методів її розв’язання	21
1.2.1. Постановка задачі аналізу функціональної придатності статичних систем	21
1.2.2. Аналіз методів розв’язання задачі аналізу функціональної придатності статичних систем	23
1.3. Постановка задачі забезпечення функціональної придатності статичних систем та особливості методів її розв’язання	26
1.3.1. Постановка задачі забезпечення функціональної придатності статичних систем	26
1.3.2. Аналіз методів розв’язання задачі забезпечення функціональної придатності статичних систем	30
1.4. Існуючі програмні середовища для аналізу і забезпечення функціональної придатності статичних систем	33
1.5. Інтервальні моделі функціональної придатності статичних систем на основі допускового еліпсоїдного оцінювання	36
1.6. Постановка задачі дисертаційного дослідження	40
ВИСНОВКИ ДО ПЕРШОГО РОЗДІЛУ	43
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ПРИДАТНОСТІ СТАТИЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ДОПУСКОВОГО ЕЛІПСОЇДНОГО ОЦІНЮВАННЯ	45

2.1.	Метод аналізу та моделювання функціональної придатності статичних систем на основі допускового еліпсоїдного оцінювання	45
2.2.	Метод допускового еліпсоїдного оцінювання функціональної придатності статичних систем з урахуванням часових змін параметрів їх компонентів	52
2.3.	Порівняльний аналіз обчислювальної складності реалізації методів Монте-Карло та допускового еліпсоїдного оцінювання	58
2.4.	Приклад застосування методу допускового еліпсоїдного оцінювання функціональної придатності систем з урахуванням часових змін параметрів їх компонентів	63
	ВИСНОВКИ ДО ДРУГОГО РОЗДІЛУ	70
	РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ПРИДАТНОСТІ СТАТИЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ІНТЕРВАЛЬНИХ ДАНИХ	72
3.1.	Метод забезпечення функціональної придатності статичних систем з оптимізацією їх параметрів на основі аналізу інтервальних даних	73
3.2.	Метод забезпечення функціональної придатності статичних систем на основі аналізу інтервальних даних з урахуванням одночасного знаходження оптимальних параметрів статичних систем та їх допусків	77
3.3.	Часова складність методу забезпечення функціональної придатності статичних систем з урахуванням одночасного знаходження оптимальних параметрів статичних систем та їх допусків з використанням різних процедур випадкового пошуку	90
	ВИСНОВКИ ДО ТРЕТЬОГО РОЗДІЛУ	99
	РОЗДІЛ 4 ПРОГРАНИЙ КОМПЛЕКС РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ	

ПРИДАТНОСТІ СТАТИЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ІНТЕРВАЛЬНИХ ДАНИХ	100
4.1. Аналіз вимог та проектування програмного забезпечення для моделювання та забезпечення функціональної придатності статичних систем	100
4.2. Моделювання та забезпечення функціональної придатності системи підготовки гіпсоводної суміші в процесі виготовлення гіпсокартону	110
4.2.1. Особливості технологічного процесу та його основні параметри	110
4.2.2. Математична модель характеристики технологічного процесу	117
4.2.3. Модель функціональної придатності лінії по підготовці гіпсоводної суміші	120
4.2.4. Метод забезпечення функціональної придатності систем на основі аналізу інтервальних даних, який дає можливість одночасного знаходження оптимальних параметрів і умов забезпечення заданої функціональної придатності систем та його програмна реалізація	123
ВИСНОВКИ ДО ЧЕТВЕРТОГО РОЗДІЛУ	134
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	135
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	138
ДОДАТОК А. Довідки про використання дисертаційного дослідження	152
ДОДАТОК Б. Лістинг програмного коду	157

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

ІСЛАР	інтервальна система лінійних алгебраїчних рівнянь
ІСНАР	інтервальна система нелінійних алгебраїчних рівнянь
ПЗ	програмне забезпечення
ПК	персональний комп'ютер
РЕК	радіоелектронне коло

## ВСТУП

### **Актуальність дослідження.**

Математичне моделювання є одним з основних інструментів при моделюванні та забезпеченні оптимальних характеристик технологічних процесів та технічних систем. Одним із таких технологічних процесів є виробництво гіпсокартону, що передбачає використання статичних систем на окремих стадіях виробництва. До статичних систем також відносять радіоелектронні кола для випадку, коли їх характеристики описують алгебричними рівняннями. Однією з основних властивостей статичних систем є її функціональна придатність – здатність системи виконувати покладені на неї функції протягом певного часу та за певних умов експлуатації. Для забезпечення функціональної придатності системи необхідним є врахування не лише технічних характеристик системи, а також і параметрів компонентів, з яких вона складається. Вагомих результатів при дослідженні проблеми забезпечення функціональної придатності систем досягли українські та закордонні вчені Гехер К., Фрідлендер І.Г., Недоступ Л.А., Spence R.

При проектуванні та дослідженні такого типу систем доводиться розв'язувати задачі аналізу та забезпечення функціональної придатності. Існуючі методи для розв'язування задачі аналізу ґрунтуються на визначенні показника функціональної придатності на основі обчислення багатовимірного інтеграла, залежно від кількості характеристик системи. Серед них найбільш застосовувані такі методи як межових та натурних експериментів, моментів, Монте-Карло тощо. Задачу забезпечення функціональної придатності статичної системи математично формулюють як оптимізаційну задачу, в якій цільова функція забезпечує вимоги до характеристик системи. Для забезпечення функціональної придатності систем широко застосовують градієнтні методи, методи стохастичного програмування та генетичні алгоритми. Однак важливою проблемою при проектуванні статичних систем є врахування часових змін параметрів та

характеристик системи в процесі експлуатації. Іншою проблемою при розв'язанні задач аналізу та забезпечення функціональної придатності систем є висока обчислювальна складність, якою характеризуються існуючі методи їх розв'язання.

Невід'ємною частиною моделювання та забезпечення функціональної придатності статичних систем також є програмні засоби. Дослідження існуючих програмних засобів для моделювання та забезпечення функціональної придатності показало, що вони переважно є спеціалізованими до певних типів технічних систем чи технологічних процесів. Іншими недоліками зазначених програмних засобів є: висока обчислювальна складність реалізованих у них методів; відсутність можливості одночасного знаходження оптимальних параметрів та умов забезпечення заданої функціональної придатності систем.

Останнім часом широкого застосування набули методи аналізу та забезпечення функціональної придатності систем на основі інтервального підходу, зокрема метод оцінювання області параметрів багатовимірними еліпсоїдами, розглянутий у працях Дивака М.П., Бакана Г.М., Куссуль Н.М., Крищука В.М., Шило Г.М. та ін. Описані методи забезпечують оцінювання функціональної придатності системи із заданою точністю, однак не враховують часові зміни параметрів компонентів у процесі експлуатації і не дають можливості одночасного знаходження оптимальних параметрів статичних систем та їх допусків.

Виходячи із вищезазначеного, актуальним є науково-технічне завдання створення математичних та програмних засобів для моделювання та забезпечення функціональної придатності статичних систем, які б враховували часові зміни параметрів компонентів системи, характеризувалися б нижчою обчислювальною складністю та давали можливість одночасного знаходження оптимальних параметрів і умов забезпечення заданої функціональної придатності систем на основі аналізу інтервальних даних.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконувалася згідно з тематичним планом науково-дослідних робіт кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету протягом 2011 – 2015 років.

Науково-дослідна робота за темою дисертації проводилася у відповідності з тематичним планом науково-дослідних робіт, що фінансувалися за рахунок коштів державного бюджету Міністерством освіти і науки України. Зокрема в рамках теми «Теорія побудови та методи реалізації в реальному часі міждисциплінарних математичних моделей зміни стану складних об'єктів» (номер державної реєстрації 0114U000569) розроблено метод обчислення параметрів статичних систем на основі допускового оцінювання, який ґрунтується на розв'язуванні інтервальної системи нелінійних алгебричних рівнянь з урахуванням допусків на параметри та обмежень на вихідні характеристики системи. У виконанні науково-дослідної роботи на тему «Макромодельовання складних систем та процесів в умовах структурної невизначеності на основі неточних даних» (номер державної реєстрації 0111U010356) аспіранткою розроблено програмний комплекс для моделювання та забезпечення функціональної придатності статичних систем. У виконанні держбюджетної прикладної розробки на тему «Інформаційна технологія для ідентифікації і візуалізації зворотного гортанного нерва в процесі хірургічної операції на щитовидній залозі» (номер державної реєстрації 0112U000078) аспіранткою розроблено метод допускового еліпсоїдного оцінювання функціональної придатності пристрою із врахуванням часової зміни параметрів компонентів у процесі експлуатації. У виконанні госпдоговірної науково-дослідної роботи на тему «Розподілена система контролю технологічного процесу виробництва гіпсокартону» (номер державної реєстрації 0112U003917) аспіранткою розроблено метод моделювання та забезпечення функціональної придатності технологічного обладнання лінії з виробництва гіпсокартону в умовах змінних характеристик сировини.



**Мета і задачі дослідження.**

Метою дисертаційного дослідження є розробка універсальних методів, алгоритмів та програмного комплексу для моделювання та забезпечення функціональної придатності статичних систем на основі аналізу інтервальних даних. Для досягнення мети дисертаційного дослідження необхідно розв'язати такі задачі:

–дослідити існуючі підходи та методи для оцінювання функціональної придатності статичних систем для розв'язування задач аналізу та забезпечення функціональної придатності систем;

–розробити метод допускового еліпсоїдного оцінювання функціональної придатності статичних систем, який враховує часові зміни параметрів компонентів;

–розробити метод забезпечення функціональної придатності статичних систем на основі аналізу інтервальних даних, який одночасно враховує обмеження на вихідні характеристики системи та забезпечує оцінювання її оптимальних параметрів;

–розробити метод забезпечення функціональної придатності статичних систем на основі аналізу інтервальних даних, який надає можливість одночасного знаходження оптимальних параметрів статичних систем та їх допусків;

–розробити на основі вищезазначених методів програмний комплекс їх реалізації для моделювання та забезпечення функціональної придатності статичних систем на основі аналізу інтервальних даних;

–провести апробацію розроблених методів на прикладі моделювання та забезпечення функціональної придатності технологічного обладнання лінії з виробництва гіпсокартону в умовах змінних характеристик сировини та для моделювання функціональної придатності радіоелектронних кіл.

**Об'єкт дослідження** – процеси забезпечення функціональної придатності статичних систем.

**Предмет дослідження** – математичні моделі та методи забезпечення функціональної придатності статичних систем на основі аналізу інтервальних даних.

**Методи дослідження.**

Для розробки та удосконалення методів оцінювання функціональної придатності статичних систем із врахуванням часових змін параметрів компонентів системи використано методи теоретико–множинного та інтервального підходів. Для одночасного знаходження оптимальних параметрів та умов забезпечення заданої функціональної придатності систем використано методи стохастичної оптимізації. Для дослідження обчислювальної складності розроблених в дисертації методів використано комп’ютерне моделювання. Для проектування програмного комплексу реалізації методів моделювання та забезпечення функціональної придатності статичних систем використано об’єктно–орієнтований підхід, а для його створення – алгоритмічну мову C# та .NET технологію.

**Наукова новизна одержаних результатів.**

У межах дисертаційної роботи *вперше*:

– запропоновано та обґрунтовано метод допускового еліпсоїдного оцінювання функціональної придатності статичних систем, який, на відміну від існуючих, враховує часову зміну параметрів компонентів системи, що забезпечило обчислення гарантованих оцінок функціональної придатності статичних систем та підвищення ступеня адекватності моделей функціональної придатності;

– розроблено метод забезпечення функціональної придатності статичних систем на основі аналізу інтервальних даних, який, на відміну від існуючих, ґрунтується на розв’язуванні інтервальної системи нелінійних алгебричних рівнянь і одночасно враховує обмеження на вихідні характеристики системи та забезпечує оцінювання оптимальних параметрів;

– запропоновано та обґрунтовано метод забезпечення функціональної придатності статичних систем на основі аналізу інтервальних даних, який

ґрунтується на розв'язуванні інтервальної системи нелінійних алгебричних рівнянь і забезпечує одночасне знаходження оптимальних параметрів статичних систем та їх допусків;

*набули подальшого розвитку* обчислювальні методи стохастичної оптимізації на основі направляючого конуса Растрігіна, які, на відміну від існуючих, забезпечують знаходження інтервальних оцінок множини оптимальних розв'язків.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що на основі запропонованих та удосконалених методів оцінювання функціональної придатності пристроїв створено програмний комплекс, який застосовується для оцінювання функціональної придатності статичних систем із врахуванням часової зміни параметрів компонентів системи в процесі експлуатації; для одночасного знаходження оптимальних параметрів статичних систем і умов забезпечення заданої функціональної придатності.

Програмний комплекс використано для моделювання та забезпечення функціональної придатності технологічного обладнання з виробництва гіпсокартону на ПП «Українські гіпсокартонні системи», радіоелектронних кіл на підприємстві ТОВ ТКБР «Стріла» та при виконанні науково-дослідних робіт. Використання результатів дисертаційної роботи підтверджено довідками про впровадження.

За результатами проведених у дисертаційній роботі досліджень створено методичне забезпечення, яке використовують у Тернопільському національному економічному університеті при підготовці студентів спеціальності «Інженерія програмного забезпечення», зокрема при викладанні дисциплін «Теорія надійності програмних систем» та «Інтервальні обчислення та інтервальний аналіз».

### **Особистий внесок здобувача.**

Усі результати, викладені в дисертації, отримані автором самостійно. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать такі

результати: [96] – досліджено задачу оцінювання функціональної придатності систем із врахуванням впливу технологічних та зовнішніх чинників у процесі експлуатації; [101] – проведено аналіз допускової області параметрів системи в залежності від технологічної області їх розсіювання; [51] – розглянуто основні особливості методів оцінювання функціональної придатності систем на основі параметричного та інтервального підходів; [112] – розглянуто підходи до вирішення задачі оцінювання функціональної придатності системи в процесі експлуатації під дією зовнішнього середовища; [103] – розроблено програмний комплекс для розв’язування задачі аналізу статичних систем на основі параметричного та інтервального підходів; [52] – проведено порівняльний аналіз обчислювальної складності при застосуванні методів аналізу функціональної придатності статичних систем; [111] – розглянуто підхід до оцінювання функціональної придатності, який ґрунтується на визначенні залежності, котра описує часову зміну параметрів компонентів системи; [97] – розроблено метод допускового еліпсоїдного оцінювання функціональної придатності статичних систем, який ураховує часові зміни параметрів компонент системи та забезпечує обчислення гарантованих оцінок функціональної придатності системи; [74] – розроблено метод забезпечення функціональної придатності статичних систем на основі аналізу інтервальних даних, який одночасно враховує обмеження на вихідні характеристики системи та забезпечує оцінювання її оптимальних параметрів; [102] – розроблено метод забезпечення функціональної придатності статичних систем на основі аналізу інтервальних даних, який надає можливість одночасного знаходження оптимальних параметрів статичних систем та їх допусків; [32] – розроблено програмний комплекс та проведено його апробацію на прикладі моделювання та забезпечення функціональної придатності технологічного обладнання лінії з виробництва гіпсокартону.

#### **Апробація результатів дисертації.**

Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на 15 наукових конференціях та семінарах, а саме: 13-й

міжнародній конференції “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science” (TCSET’2014), Львів-Славське – 2014 р.; 12-й та 13-й міжнародних конференціях “The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics” (CADSM’2013, CADSM’2015), Львів – Поляна – 2013 р., 2015 р.; Computational Problems of Electrical Engineering and Advanced Methods of the Theory of Electrical Engineering, Roztoky, Czech Republic – 2013 р.; IV-й міжнародній конференції з індуктивного моделювання, Київ – 2013 р.; 7-й та 8-й міжнародних літніх школах-семінарах для молодих науковців «Індуктивне моделювання: теорія і застосування», с.Жукін, Київська обл. – 2014р., 2015р.; 1-й – 5-й всеукраїнських школах-семінарах молодих вчених і студентів «Advanced Computer Information Technology» (АСІТ’2011 – АСІТ’2015), Тернопіль, 2011 – 2015 рр.); проблемно-науковій міжгалузевій конференції «Інформаційні проблеми комп’ютерних систем, юриспруденції, енергетики, економіки, моделювання та управління» (ПНМК-2011), Яремче – 2011 р.; науково-практичних конференціях професорсько-викладацького складу Тернопільського національного економічного університету (2011-2015 рр.).

### **Публікації.**

Результати дисертації опубліковано в 14 наукових працях (3 опубліковано одноосібно) загальним обсягом 81 сторінка, з них 1 стаття в науковому періодичному виданні іншої держави, яке входить до Міжнародної наукометричної бази Scopus [109], 5 статей у фахових наукових виданнях України, дві з них входять до Міжнародної наукометричної бази Scopus [54,108], та 8 публікацій у матеріалах конференцій та семінарів, з них 1 публікація входить до Міжнародної наукометричної бази Scopus [102].

### **Структура та обсяг роботи.**

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, списку використаних джерел та двох додатків. Загальний обсяг роботи складає 166 сторінок. Основний зміст викладено на 132 сторінках. Робота містить 58 рисунків та 3 таблиці. Додатки на 15 сторінках. Список використаних джерел містить 127 найменувань.

## РОЗДІЛ 1

### ЗАДАЧІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ПРИДАТНОСТІ СТАТИЧНИХ СИСТЕМ

Отримання інформації про стан різноманітних процесів та параметрів системи за допомогою статичних систем набуває все більшого значення в багатьох сферах людської діяльності: виробничій, сфері авіації та космонавтики, екологічного моніторингу навколишнього середовища, медицині тощо. Значну роль тут відіграє точність вимірювання, яка безпосередньо залежить від функціональної придатності системи. Забезпечення функціональної придатності технічних систем та технологічних процесів є комплексною проблемою, вирішення якої відбувається на всіх етапах життєвого циклу функціонування системи: у проектуванні, при виробництві, під час технічного обслуговування та ремонт у процесі експлуатації.

При проектуванні статичних систем розв'язують дві основні задачі: задачу аналізу та задачу забезпечення функціональної придатності. Під час розв'язування задачі аналізу проводиться оцінювання функціональної придатності системи за обраною схемою та її конструкції в статичному режимі роботи [72]. Задача забезпечення функціональної придатності полягає в оптимізації схеми та параметрів статичної системи за різноманітними критеріями, які характеризують її функціональну придатність [87].

Процес проектування складається з декількох циклів вирішення задач аналізу та забезпечення функціональної придатності, а саме: на основі забезпечення функціональної придатності системи приймають рішення, потім за допомогою аналізу перевіряють їх ефективність, після цього знову повторюють першу задачу. І так триває до отримання бажаного результату.

Таким чином, для оцінювання функціональної придатності статичної системи доцільно розглядати як задачу аналізу, так і задачу забезпечення функціональної придатності.

## 1.1. Особливості статичних систем та їх найважливіша характеристика функціональна придатність

Існує множина визначень поняття «система». Виділимо з них окрему пару, а саме ту, яка найбільш повно розкриває основні властивості наведеного терміну. Отже,

- система є визначеною множиною взаємопов'язаних елементів, які утворюють стійку єдність та цілісність, що характеризується інтегральними властивостями та закономірностями;

- система є набором об'єктів, які мають певні властивості та набір зв'язків між об'єктами і їх властивостями тощо [83].

В загальному будемо послуговуватися поняттям системи, яке враховує такі важливі складові будь-якого матеріального об'єкту як елемент, зв'язок, взаємодія та цілеспрямованість (див. рис. 1.1.).



Рис. 1.1. Схема компонентів системи [83]

До основних властивостей систем варто віднести наступні [125]:

- цілісність – кожний елемент системи відіграє певну роль в реалізації цільової функції системи;
- організованість – наявність структури та функціонування (поведінки) системи;
- функціональність – прояв певних властивостей (функцій) при взаємодії із навколишнім середовищем;
- структурність – упорядкованість системи, визначений набір та розміщення елементів та зв'язків між ними;
- стійкість – здатність системи протистояти зовнішнім впливам тощо .

Це ряд властивостей, притаманних будь-яким системам різного типу та призначення. Однак для спрощення дослідження систем їх класифікують за різноманітним ознакам та в залежності від типу поставленої задачі.

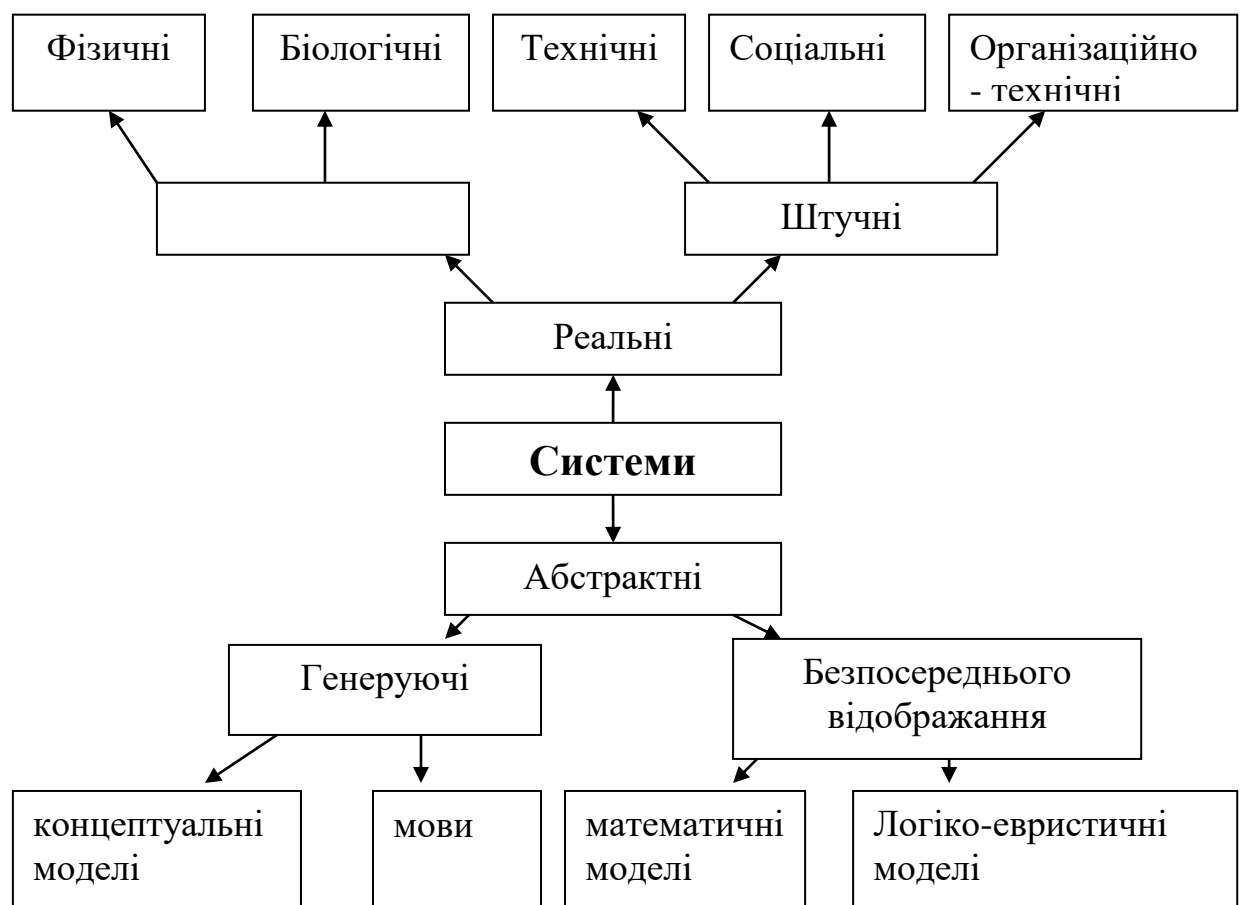


Рис. 1.2. Класифікація систем [125]



Класифікація є поняттям відносним і в даному випадку означає розбиття на класи за найбільш суттєвими ознаками. Система може бути охарактеризована одною або декількома ознаками. Відповідно до цього їй відводиться місце в різноманітних класифікаціях, кожна з яких може бути використана при обранні методології дослідження. На рисунку 1.2 наведений один із варіантів класифікації систем [125].

За змістом розрізняють реальні (матеріальні), ті що об'єктивно існують, та абстрактні (концептуальні, ідеальні), які є продуктом мислення. Зупинимось детальніше на класі реальних систем.

*Реальні системи* діляться на природні та штучно створені (антропогенні). *Штучні системи* створюються людиною для власних потреб та виникають у результаті ціленаправлених зусиль. Вони поділяються на технічні (техніко-економічні) та соціальні (загальні). Штучні системи можна умовно віднести до постійних, оскільки в процесі заданого часу функціонування зберігають суттєві властивості, котрі визначаються призначенням цих систем [125].

*Технічна система* проектується та виготовляється людиною з певною метою. Виокремлення систем, які складаються лише з технічних пристроїв, майже завжди умовна, оскільки вони не здатні продукувати свої стани. Ці системи можуть бути частинами більш широких систем, котрі можуть включати і людину (технологічні, організаційно-технічні системи).

У залежності від ступеня зміни властивостей технологічні та технічні системи поділяються на статичні та динамічні. До статичних як класу безінерційних систем відносять системи, вихідні характеристики яких у будь-який момент залежать лише від значень вхідних параметрів системи і її поточного стану. Зв'язок між вхідними параметрами та вихідними характеристиками описується алгебричними рівняннями [29].

Статичні системи характеризуються численними та різноманітними властивостями, які можна класифікувати за різними категоріями. Зокрема

- за способом їх встановлення (зовнішні та внутрішні);

- за зв'язками (вхідні та вихідні);
- за функціональною залежністю (змінні та незмінні властивості);
- за дієвою складовою (продуктивність, швидкодія, маса, функціональність тощо);
- ергономічні властивості (зручність, способи обслуговування тощо);
- виробничі властивості (безпека експлуатації, строк служби, витрати енергії, функціональна придатність, ремонт придатність тощо) [125].

Однією з найважливіших властивостей статичної системи є її функціональна придатність. Поняття «функціональна придатність» або «надійність» пристрою є усталеними в інженерній практиці. Переважно пристрій виготовляють, розраховуючи на його довгострокове використання для практичних цілей. Проте поняття «довгострокове використання» для різних пристроїв трактується по-різному, в залежності від складності та призначення. Згідно з відомою класифікацією [76,94] пристрої поділяють на:

- пристрої, для котрих функціональна придатність не є важливою характеристикою;
- пристрої, низька функціональна придатність котрих може призвести до суттєвих економічних витрат;
- пристрої, недостатньо висока функціональна придатність котрих узагалі не припустима.

У роботі досліджуються статичні системи, в яких функціональна придатність відіграє надзвичайно важливу роль як сукупність елементів, що взаємодіють між собою в процесі виконання заданих функцій. Тобто *функціональна придатність* – властивість системи (об'єкту) зберігати в просторі та часі у встановлених межах значення усіх параметрів, які характеризують здатність виконувати певні функції в заданих режимах та умовах експлуатації [15,64,65].

Певний час для оцінювання функціональної придатності статичних систем використовували якісні оцінки (високу або низьку придатність), що унеможливило її об'єктивну оцінку. Встановлення кількісного показника

функціональної придатності та способів його вимірювання і розрахунку поклало початок науковим методам у дослідженні функціональної придатності. Існуючі підходи [10] ґрунтуються на розрахунку показника функціональної придатності на основі обчислення багатовимірного інтеграла залежно від кількості характеристик системи (наприклад, метод Монте-Карло). Насьогодні показник функціональної придатності системи можна отримати і методом довірчих еліпсоїдів [27,35,73,96] на основі аналізу інтервальних даних.

При оцінюванні функціональної придатності пристрою припускають, що, як і в процесі виготовлення пристрою, так і під час його експлуатації, випадкові відхилення параметрів елементів пристрою від номінальних розподілені за нормальним законом. Однак, якщо під час виготовлення пристрою зазначений розподіл випадкових відхилень переважно відповідає дійсності, то для експлуатаційних відхилень параметрів елементів пристрою від номінальних розподіл не завжди буде нормальним. Під час експлуатації пристрою відбувається старіння компонентів, тобто незворотна зміна властивостей елементів, вузлів і пристроїв в цілому, тобто їх погіршення в порівнянні з первинними або встановленими вимогами технічної документації. Коли величина відхилення досягає критичного значення, настає відмова – явище, яке полягає в тому, що система частково або повністю припиняє виконувати свої основні функції [10]. Відомо, що часові зміни параметрів компонентів складних систем, котрі містять велику кількість неремонтованих елементів та мають здебільшого раптові відмови, можуть бути описані часовими залежностями, які розподілені за експоненціальним законом [17,78,113].

Статичні системи широко використовують у технічних системах та технологічних процесах, пов'язаних із виготовленням різних видів продукції. До технічних систем відносять радіоелектронні кола для випадку, коли їх характеристики описують алгебричними рівняннями. Прикладом технологічного процесу є процес виробництва гіпсокартону, який передбачає

використання різних статичних технічних систем на окремих стадіях виробництва, зокрема під час змішування компонентів для підготовки гіпсо-водної суміші, підготовки листів гіпсокартону до етапу попереднього сушіння, різки листів гіпсокартону визначеної величини та сушіння листа в сушильній камері. Важливим є і забезпечення функціональної придатності всієї технологічної системи в цілому і, зокрема, окремих статичних технічних систем, які відповідають за окремі етапи технологічного процесу. Як приклад, для забезпечення функціональної придатності системи, яка відповідає за стадію підготовки гіпсо-водної суміші в процесі виробництва гіпсокартону, необхідним є врахування не лише технічних характеристик системи (зокрема швидкості згущення суміші та величини в'язкості), а також і властивостей компонентів з яких вона складається (зокрема властивостей гіпсу, які можуть змінюватись під час тривалого зберігання, швидкості подачі води та швидкості подачі суміші). Якщо порівняти складність та необхідність забезпечення функціональної придатності статичних систем, з яких складається процес виробництва гіпсокартону, то система, пов'язана зі стадією підготовки гіпсо-водної суміші є найважливішою, адже враховує багато початкових властивостей компонентів системи, які на наступних етапах скорегувати вже не можливо. Зокрема на етапі сушіння листа гіпсокартону питання функціональної придатності полягає лише в забезпеченні температурного поля сушіння листа для рівномірного розподілу вологості на ньому [41].

Отже, як бачимо з вищеописаного, моделювання та забезпечення функціональної придатності статичних систем є важливою та актуальною задачею. Для постановки задачі моделювання та забезпечення функціональної придатності систем будемо розглядати клас систем, зокрема статичних, характеристики та параметри компонентів яких можуть змінюватися в часі під дією зовнішніх впливів. Наприклад, під час підготовки гіпсо-водної суміші в процесі виготовлення гіпсокартону використовують різні матеріали, зокрема гіпс, властивості якого можуть змінюватися під час

тривалого зберігання на складі, а при оцінці функціональної придатності радіоелектронних пристроїв варто враховувати температурні дрейфи, зношуваність параметрів елементів пристроїв з часом тощо.

Для розв'язання задачі моделювання та забезпечення функціональної придатності статичних систем розглядають протилежні задачі аналізу та забезпечення функціональної придатності.

## **1.2. Постановка задачі аналізу функціональної придатності статичних систем та особливості методів її розв'язання**

### **1.2.1. Постановка задачі аналізу функціональної придатності статичних систем**

Задача аналізу полягає у визначенні реакції системи на задану зовнішню дію. Початковими даними для аналізу є принципова схема статичної системи, моделі компонентів схеми та визначення їх параметрів, а також задана зовнішня дія. Очевидно, що дослідник вибирає такі моделі компонентів, які дають змогу враховувати вплив саме тих зовнішніх факторів, які необхідно проаналізувати [11].

Задача аналізу дозволяє оцінити відповідність проектного рішення (визначеної дослідником початкової схеми системи) поставленим вимогам та його функціональну придатність. За результатами аналізу можна змінити досліджувану схему, розглядаючи різні варіанти її модифікації, та обрати той, який краще за інші задовільняє обраний критерій [44].

Отже, при розв'язуванні задачі аналізу функціональної придатності статичних систем спочатку визначають певні вихідні характеристики системи у вигляді:

$$y = \varphi_i(\vec{x}), i = 1, \dots, N, \quad (1.1)$$

де  $\vec{x}$  - відомий вектор параметрів системи;  $\varphi_i(\vec{x})$  - набір базових функцій, які

визначають залежність між вектором параметрів та відповідними вихідними характеристиками системи.

Далі задають обмеження на вихідні характеристики системи:

$$[y^-; y^+], \quad (1.2)$$

де  $y^-; y^+$  - відповідно нижнє та верхнє значення обмежень на вихідну характеристику статичної системи.

Для  $j$  вихідних характеристик рівняння (1.1) із врахуванням обмежень (1.2) подають у вигляді системи інтервальних рівнянь вигляду:

$$\begin{cases} y_1^- < \varphi_i(\vec{x}) < y_1^+, \\ \dots \\ y_j^- < \varphi_i(\vec{x}) < y_j^+, \\ \dots \\ y_m^- < \varphi_i(\vec{x}) < y_m^+. \end{cases} \quad (1.3)$$

У процесі аналізу системи перевіряють, чи вихідні характеристики (1.1) при певних умовах експлуатації системи перебувають у заданих межах (1.2). Якщо умови перевірки виконуються, то вважають, що система є функціонально-придатною. Одночасно параметри системи в процесі і функціонування, й виготовлення відрізняються від запроектованих. Тому часто оперують поняттям ймовірності забезпечення функціональної придатності. Наприклад, у методі Монте-Карло для перевірки ймовірності забезпечення характеристик системи задають параметр закону розподілу параметрів елементів, генерують випадкові числа за вказаним законом і перевіряють, чи при таких розсіюваннях параметрів елементів від номінальних значення характеристик знаходяться у визначених межах (детальніше див. пункт 1.2.2).

У подальших дослідженнях робимо такі припущення:

- залежність між вхідними параметрами системи та вихідними

характеристиками повинна бути подана в явному вигляді, тобто для статичної системи це означає наявність алгебричних рівнянь, які поєднують характеристики системи з її параметрами;

- процес створення компонентів системи повинен бути таким, який призводить до відхилення параметрів системи від номінальних відповідно до нормального закону розподілу або до логарифмічно-нормального закону розподілу.

### **1.2.2. Аналіз методів розв'язання задачі аналізу функціональної придатності статичних систем**

Для оцінювання функціональної придатності систем при розв'язуванні задачі аналізу використовують наступні методи: метод межових та натурних експериментів, метод моментів, метод Монте-Карло [59,66,75,79,80] тощо. Коротко наведено основні переваги та недоліки цих методів.

#### Методи натурних та межових експериментів

Метод межових експериментів дозволяє визначити відхилення параметрів системи за даними відхиленнями параметрів елементів [75].

При проектуванні систем зазвичай задають вимоги до параметрів деяких елементів. Параметрами інших елементів проектувальник може варіювати, враховуючи встановлені вимоги. З варійованих параметрів завжди можна обрати той, який має найбільший вплив на параметр системи. Він називається основним або параметром межових експериментів.

Над системою проводиться декілька послідовних дослідів. У кожному досліді одночасно змінюються в достатньо широких межах параметри двох елементів, і один із них основний. При проведенні дослідів визначаються значення параметра системи і фіксуються ті з них, які задовільняють вимоги. За результатами дослідів будуються графіки, які демонструють області стійкості роботи, всередині яких параметр схеми задовільняє вимоги.

Перевага методу в тому, що він дозволяє визначити область стійкої

роботи системи і вибрати номінальні значення параметрів елементів так, щоб номінальне значення вихідного параметра системи знаходилося всередині цієї області. Суттєвий недолік цього методу полягає в тому, що останній дозволяє проводити дослідження системи при одночасній зміні лише двох параметрів елементів, тобто відхилення вихідного параметру системи є функцією лише двох змінних, що призводить до обчислення неточних оцінок функціональної придатності системи.

Метод натурних експериментів – це емпіричний метод оцінки параметрів системи. Як модель використовуються декілька зразків системи з різними значеннями параметрів. На кожному зразкові вимірюється рівень параметра. Результати вимірювань обробляються статистично [75].

У залежності від способу обробки результатів вимірювань метод дозволяє зробити висновок про прийом (чи забракування) системи, отримати кількісне значення ймовірності потрапляння параметра в задану область допусків та побудувати закон розподілу параметра.

#### Метод моментів

Метод моментів [16] базується на застосуванні операції дисперсії до рівняння вихідного параметра системи. Під час аналізу цим методом системи використовують нормальний закон розподілу відхилень параметрів елементів і вихідного параметра системи. Цей метод дає абсолютно точні результати тільки для лінійних систем у відповідності з нормальним законом розподілу. Для нелінійних систем навіть при нормальну законі розподілу параметрів елементів закон розподілу вихідного параметра системи відмінний від нормального, а математичне сподівання вихідного параметра не дорівнює його номінальному значенню. Тому при аналізі нелінійних систем виникають значні помилки. Однак навіть із врахуванням цих недоліків метод моментів кращий за метод найгіршого випадку.

Метод Монте-Карло. Поява методів імітаційного моделювання (Монте-Карло) у різноманітних областях прикладної математики, як правило, пов'язана з необхідністю вирішення якісно нових практичних задач. Метод



Монте-Карло – це чисельний метод розв’язування математичних задач і прямого імітаційного моделювання за допомогою отримання та перетворення випадкових чисел [51,52].

Неперервний випадковий процес, роботу системи до відмови, описують різними законами розподілу в залежності від властивостей системи та її елементів, умов роботи, характеру відмов та ін.[17,78].

Загальна схема методу Монте-Карло базується на центральній граничній теоремі теорії ймовірності, яка стверджує, що випадкова величина  $Y = \sum_{i=1}^N X_i$  дорівнює сумі великої кількості  $N$  довільних випадкових величин  $X_i$  з однаковими математичними сподіваннями  $m$  та дисперсіями  $\sigma^2$ , завжди розподілена за нормальним законом із математичним сподіванням  $N \cdot m$  та дисперсією  $N \cdot \sigma^2$ . Нормальний закон розподілу характеризується щільністю ймовірності [17]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.4)$$

де  $m$  -математичне сподівання величини  $X$ , а  $\sigma^2$  - дисперсія величини  $X$ .

Основою методу Монте-Карло складає генератор випадкових чисел. Генерація довільного випадкового числа складається з двох етапів [99]:

- генерація нормалізованого випадкового числа (рівномірно розподіленого від 0 до 1);
- перетворення випадкового числа в довільний закон розподілу .

Генератор псевдовипадкових чисел (ГПВЧ) – алгоритм, що генерує послідовність, елементи якої майже не залежні один від одного і відповідають заданому закону. На практиці в більшості випадків застосовують програмні методи генерації. Одним з таких в середовищі Microsoft Visual Studio є параметрична функція генерування випадкових чисел – `random`. Зокрема функція `MVNRND` – функція генерації псевдовипадкових чисел за багатовимірним нормальним розподілом.

Синтаксис цієї функції такий:  $R = mvnrnd(MU, SIGMA, cases)$  генерує матрицю псевдовипадкових чисел із розмірністю  $cases \times n$ , які розподілені за багатовимірним нормальним законом розподілу з параметрами математичного сподівання  $MU$  та коваріаційною матрицею  $SIGMA$ . Розмірність матриці  $MU$   $1 \times n$ . Матриця  $SIGMA$  повинна бути квадратною та додатньо-означеною, розмірності  $n \times n$  [127].

До основних переваг методу Монте-Карло слід віднести такі: урахування в повній мірі функціонування досліджуваних систем; прості схеми обчислюваного алгоритму; можливість моделювання випадкових величин із заданими законами розподілу; незначна чутливість до випадкових відмов обчислювального засобу в процесі моделювання.

Однак, будучи наділеними вищезазначеними перевагами, метод Монте-Карло має певні недоліки, найбільш суттєвими з яких є: частковий характер розв'язку; зростання обчислювальної складності із збільшенням числа ітерацій [51,52]. Застосування методу Монте-Карло [78,110] не забезпечує достатньої точності через помилки заокруглення, а також через зміну внаслідок цих похибок законів щільності розподілу випадкових відхилень характеристик системи.

Останнім часом розвиваються перспективні методи допускового еліпсоїдного оцінювання, які ґрунтуються на розв'язуванні інтервальної системи лінійних алгебричних рівнянь і дають можливість в явному вигляді визначити функціональну придатність як імовірність виконання умов (1.3).

### **1.3. Постановка задачі забезпечення функціональної придатності статичних систем та особливості методів її розв'язання**

#### **1.3.1. Постановка задачі забезпечення функціональної придатності статичних систем**

Задача забезпечення функціональної придатності [45] є суттєво

складнішою від задачі аналізу, оскільки передбачає багаторазове розв'язування задач аналізу. Задача забезпечення функціональної придатності, на відміну від задачі аналізу, полягає не тільки в оцінці чи характеристики системи для заданих параметрів знаходяться в певних межах, а й у визначенні значень цих параметрів.

Для того щоб оцінити функціональну придатність системи при розв'язуванні задачі забезпечення функціональної придатності, необхідно залежність між вихідними характеристиками системи та вхідними параметрами задати або в аналітичному вигляді, або алгоритмічно [110].

Фізична реалізація характеристик статичних систем задовільняє певні умови, які називаються критеріями фізичної реалізації. Формулювання цих критеріїв залежить від елементного базису статичної системи та від того, якою є вихідна характеристика [67].

Для розв'язку цієї задачі необхідно, перш за все, обрати формальний критерій оцінки кожного з варіантів розроблюваної системи, котрий дозволив би розрізнити їх між собою та встановлювати між ними відношення переваги. Така оцінка може бути представлена функціональною залежністю виду [9]

$$F(\vec{x}) \xrightarrow{\vec{x}} \min(\max), \vec{x} \in \Psi, \quad (1.5)$$

зазвичай званою критерієм оптимальності, функцією мети або цільовою функцією [31,36]. Критерій ураховує виконання умов (1.3) і забезпечує пошук невідомого вектора параметрів  $\vec{x}$  в області параметрів  $\Psi$ , яка може формуватися, наприклад, із фізичних міркувань.

Складнішою є постановка задачі, коли необхідно знайти не лише значення параметрів, які забезпечують функціональну придатність статичних систем, а й можливі їхні межі. Такі постановки задачі мають важливе практичне значення, оскільки дають можливість знайти не тільки оптимальні параметри, але й їх допуски, враховуючи технологічні особливості

виготовлення цих параметрів. Аналіз фахової літератури показав, що такі постановки задач відсутні в силу їх надзвичайної складності.

За основу для побудови більшості числових методів обчислення параметрів статичних систем слугує ітераційна оптимізація, суть якої полягає в послідовній модифікації параметрів системи згідно з деяким алгоритмом з метою досягнення вимог, поставлених до вихідних характеристик системи.

Узагальнена схема роботи ітераційних оптимізаційних алгоритмів подана у вигляді UML-діаграми діяльності на рисунку 1.3.

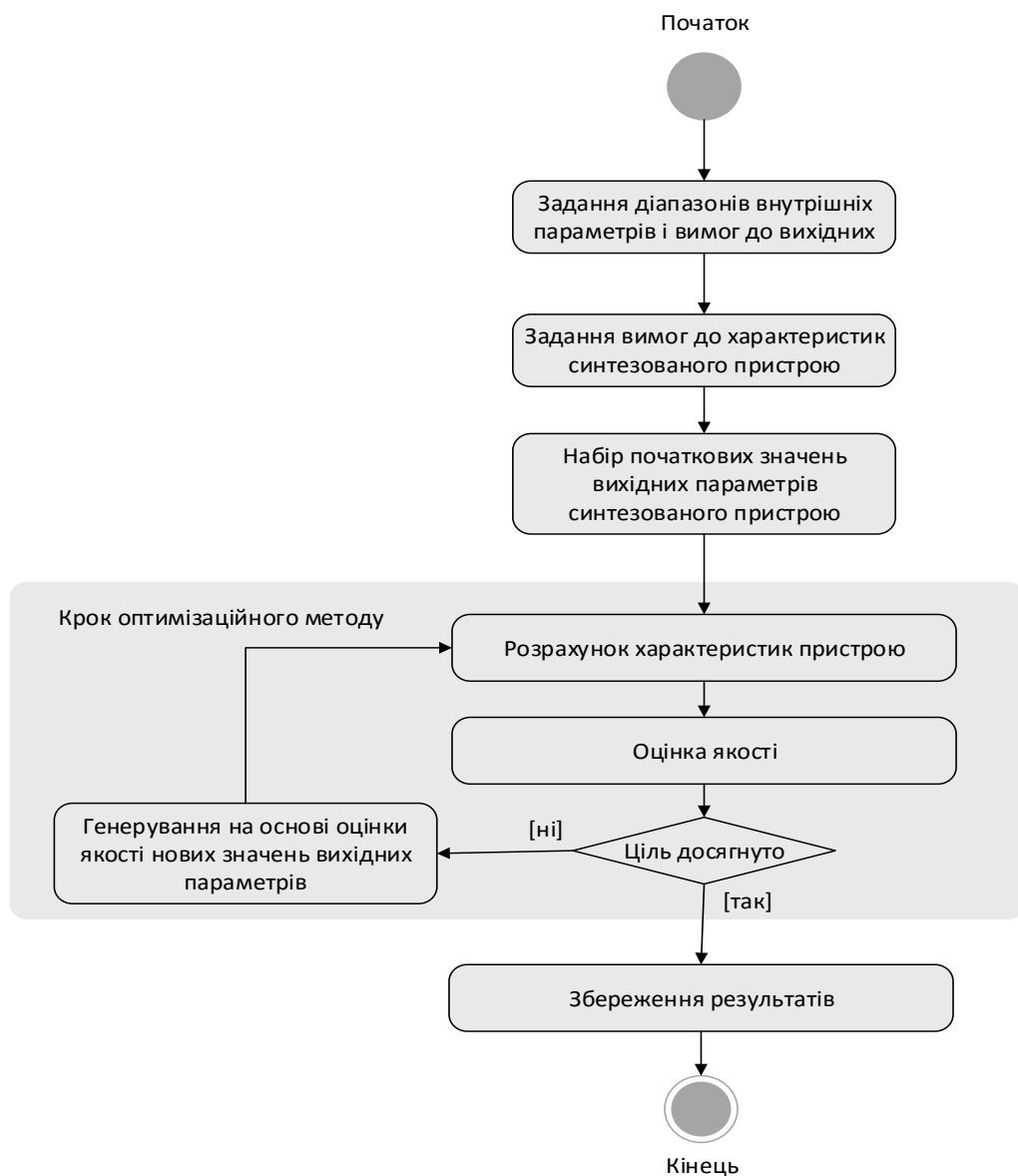


Рис. 1.3. Схема ітераційної оптимізації [60]

У загальних рисах проаналізуємо представлену схему. Перед початком

задачі забезпечення функціональної придатності виділяються вхідні та вихідні параметри статичної системи та задаються вимоги до характеристик системи оптимізації. Розрахунок характеристик системи виконується, виходячи з варіації значень вхідних параметрів на поточній ітерації оптимізаційного алгоритму. Зв'язок зміни параметрів системи з її характеристиками забезпечується за допомогою математичної моделі системи [60]. Після обчислення характеристик системи виконується чисельна оцінка, тобто визначення ступеня їх відповідності до поставлених вимог. На основі отриманої оцінки оптимізаційний алгоритм вибирає наступні значення зміни параметрів системи.

Найчастіше процес оптимізації на основі ітераційних методів виконується до того моменту, доки його не зупинить проектувальник, оскільки в загальному випадку завжди існує імовірність знаходження кращого розв'язку.

Задачі оптимального проектування статичних систем мають ряд особливостей, до яких відносять багатокритеріальність та «яровий характер» функції якості, наявність обмежень на вхідні та вихідні параметри спроектованого пристрою, велику розмірність вектора варійованих параметрів[18].

Стратегія розв'язування задач оптимального проектування передбачає застосування глобальних процедур оптимізації на початкових етапах пошуку та уточнення отриманого глобального рішення швидкозбіжними в околі оптимальної точки локальними алгоритмами. Така стратегія дозволяє, по-перше, з достатньою оцінкою функціональної придатності та точністю визначити значення глобального екстремуму і, по-друге, суттєво знизити обчислювальні витрати на пошук. При цьому етапи глобального пошуку можуть виконуватися з невисокою точністю, а етапи локального уточнення проводять в околі глобального екстремуму, що потребує значно меншої кількості ітераційних обчислень [11].

Зазвичай на вихідні параметри статичної системи задаються певні

межі, вихід за які означатиме її відмову. Виникає задача знаходження залежності між допуском на вихідний параметр системи та допусками на параметри елементів, з яких вона складається. Визначення допусків на параметри елементів за заданим допуском на параметри схеми системи створює задачу забезпечення функціональної придатності щодо заданої точності її вихідних параметрів.

Таким чином, розглянута постановка задачі забезпечення функціональної придатності статичних систем є оптимізаційною задачею. Аналіз літератури показав, що на сьогодні постановки задачі забезпечення функціональної придатності систем із врахуванням обмежень на вихідні характеристики та пошуком оптимальних параметрів системи з їх допусками відсутні.

### **1.3.2. Аналіз методів розв'язання задачі забезпечення функціональної придатності статичних систем**

Для оцінювання функціональної придатності систем при розв'язуванні задачі забезпечення функціональної придатності використовують градієнтні методи, методи глобального та локального пошуку, метод нульового пошуку, генетичні алгоритми тощо.

#### Генетичний алгоритм

Генетичний алгоритм – це стохастичний метод оптимізації і пошуку, який базується на принципах генетики та природного відбору [12,63]. Особливістю алгоритму є те, що він працює з набором рішень (геномів). На кожному кроці алгоритму створюється нове покоління (набір геномів). Для цього з попереднього покоління процедурою селекції відбирають найбільш пристосованих геномів-батьків (пристосування показує, наскільки обране рішення оптимальне). Далі під час процедури схрещування створюються нові геноми і процедура відбору найбільш пристосованих повторюється, і з них формується нове покоління[46]. Алгоритм продовжує виконання описаних

процедур до моменту зупинки, після чого обереться один із найбільш пристосованих геномів, який і стане розв'язком задачі забезпечення функціональної придатності[58]. Генетичні алгоритми слугують в основному для пошуку розв'язку в дуже великих та складних просторах пошуку.

#### Алгоритми глобального та локального пошуку

Також широко застосовують для задач забезпечення функціональної придатності методи глобального та локального пошуку. Алгоритми глобального пошуку, як правило, дають достатньо жорстку оцінку глобального екстремуму за невеликих затрат обчислювальних ресурсів і потребують значного збільшення кількості обрахунків для отримання більш точної оцінки положення екстремуму [121].

Найбільш простим, з точки зору обчислювального процесу, є алгоритм пошуку глобального екстремуму, що базується на зондуванні допускової області параметрів статичної системи послідовністю рівномірно розподілених в ній точок з відбором найкращого варіанту з отриманих.

Багатомірна оптимізація за допомогою алгоритму будується на розгортці, котра відображає відрізок  $[0,1]$  дійсної вісі в гіперкуб допускової області параметрів. За допомогою розгортки здійснюється однозначне і неперервне відображення  $X(\mu)$ , яке для будь-якої точки  $\mu \in [0,1]$  дозволяє отримати точку  $X \in R$ , де  $R$ - допускова область параметрів системи. Тоді задача мінімізації  $F(X)$  в області  $R$  еквівалентна пошуку мінімуму  $\mu^*$  одновимірної функції  $F(X) = F(X(\mu))$ . Описаний метод доцільно застосовувати на перших 50-100 ітераціях, коли алгоритм дає достатньо хорошу оцінку глобального пошуку лише при кількості параметрів системи не більше 5-7 [121].

Методи та алгоритми локального пошуку частіше за все шукають найближчий локальний екстремум, а траєкторія їх руху залежить від вибору початкової точки та характеру цільової функції. Методи нульового пошуку (прямі методи) в своїй основі не мають жорсткого математичного

обґрунтування і базуються на основі розумних припущень та емпіричних даних [121].

### Метод покоординатного спуску

Найпростішим методом нульового порядку є метод покоординатного спуску. На кожному кроці цього методу фіксуються всі змінні, окрім тієї, за якою визначається мінімум цільової функції. Послідовним перебором змінних досягається оптимізація. Цей алгоритм стає не ефективним, якщо цільова функція містить вирази типу  $X_1 \cdot X_2$ . Для задач забезпечення функціональної придатності саме технічних систем характерна складна залежність аналітичного виразу цільової функції від компонентів схеми, і тому цей метод застосовується дуже рідко [1].

Із методів нульового порядку у випадку «ярового» характеру цільових функцій прийнятні результати дає метод Розенброка, в якому поєднані ідеї покоординатного спуску та ідеї перетворення координат. Найкращим напрямом пошуку екстремуму є рух уздовж «яру». Тому після першого циклу покоординатного спуску проводиться поворот вісей координат так, щоб одна з них збігалася з напрямом «яру»  $X^k - X^{k-n}$ ,  $k = n, 2n, 3n, \dots$ . Метод Розенброка не дає інформації про потрапляння в точку мінімуму. Тому пошук завершується або після того, як зменшення цільової функції  $F(X)$  стане менше від деякого малого числа  $\varepsilon$ , або після деякої визначеної кількості циклів.

До задач забезпечення функціональної придатності систем також можна застосувати і градієнтні методи. Відомо, що при пошуку екстремуму не існує кращого напрямку, ніж рух по градієнту. Із градієнтних методів одним з найбільш ефективних є метод Флетчера-Пауела, котрий є різновидом методу найшвидшого спуску [1].

Отже, підсумовуючи вищевикладене можна зробити висновок, що кожний із розглянутих методів може бути застосований в задачах забезпечення функціональної придатності статичних систем. Однак



імовірність їхнього застосування до конкретної задачі залежатиме від виду та кількостей вихідних характеристик, а також вигляду цільової функції. Останнім часом у задачах забезпечення функціональної придатності систем, як і в задачах аналізу, широкого застосування набувають методи інтервального аналізу даних, зокрема і метод довірчих еліпсоїдів, які дозволяють уникнути ряду вищеписаних недоліків. Більш детальніше методи інтервального аналізу даних опишемо в подальших розділах.

#### 1.4. Існуючі програмні середовища для аналізу і забезпечення функціональної придатності статичних систем

Перед розробкою будь-якого програмного комплексу важливим є дослідження вже існуючих розробок в обраній сфері, виділення основних характеристик кожного з них та аналізу їхніх переваг та недоліків. Найбільш застосовуваними та відомими програмними продуктами в сфері моделювання та забезпечення функціональної придатності статичних систем, зокрема технічних, є PSpice, Мікро-Сар, АСОНІКА тощо [68].

На рисунку 1.4. наведена екранна форма роботи в програмному продукті Мікро Сар 9 [122].

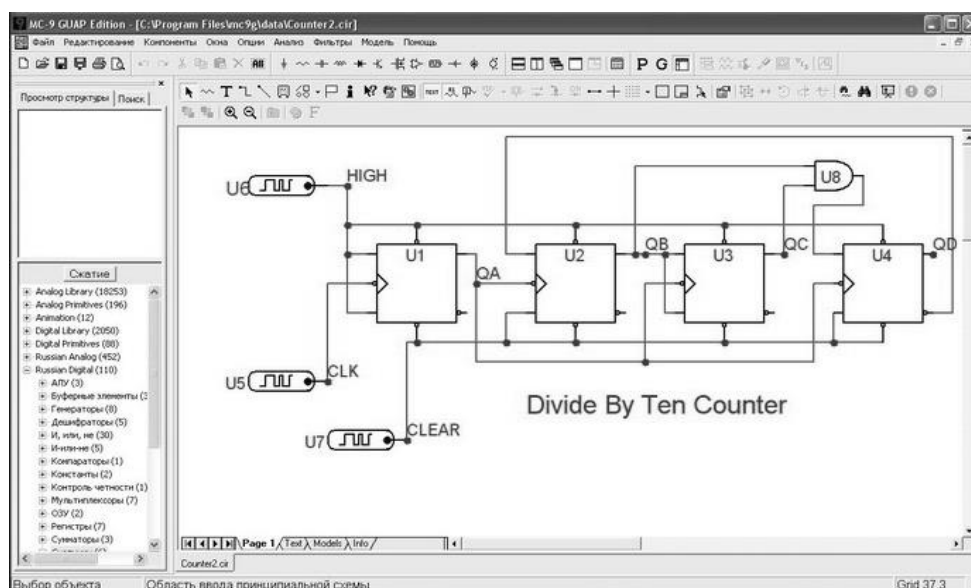


Рис. 1.4. Екранна форма роботи в програмному пакеті Мікро Сар 9 [122]

За допомогою вказаного програмного продукту виконують графічний увід проектованої схеми та аналіз характеристик аналогових, цифрових та аналогово-цифрових пристроїв. Програмна система, призначена для схемотехнічного моделювання на ПК, дозволяє швидко та наочно будувати графіки залежностей характеристик схем від варійованих параметрів. У цій програмі наявний аналіз нелінійних схем за постійним струмом, розрахунок перехідних процесів та частотних характеристик [122].

Основним недоліком програмного продукту є недостатня елементна база, подана у вигляді суто іноземних аналогів, що впливає на чітке проектування схеми. Однак для перших кроків у моделюванні системи вказана програма може бути застосована.

На рисунку 1.5. подана екранна форма програмного продукту PSpice, програми загального призначення для моделювання аналогових та змішаних схем, яка використовується для перевірки складених схем [68].

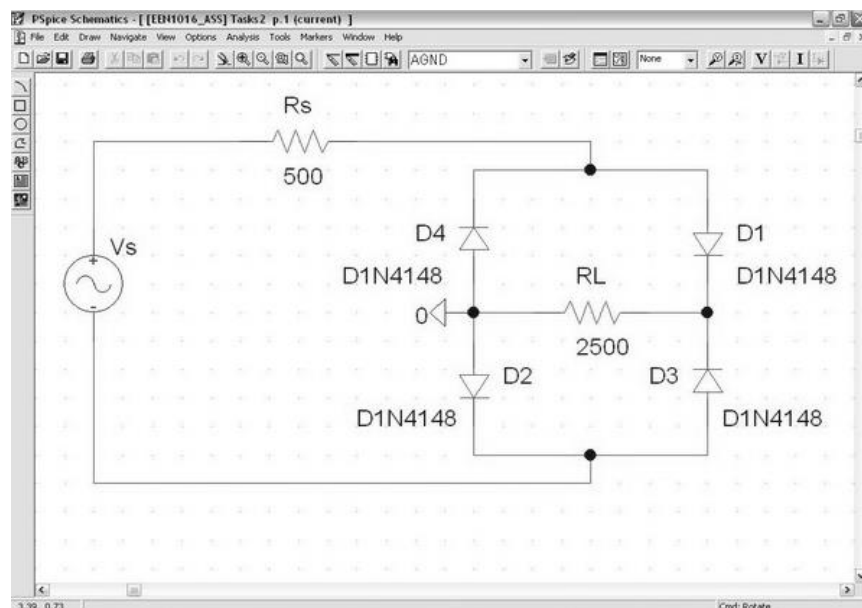


Рис. 1.5. Екранна форма роботи в програмному пакеті PSpice [68]

Здебільшого програмний продукт застосовується до інтегральних схем (що впливає з аббревіатури SPICE). В PSpice проводиться декілька типів аналізу схем, зокрема нелінійних кіл постійного струму, перехідних процесів та аналіз Фур'є, аналіз шумів, параметричний аналіз та аналіз за методом Монте-Карло тощо.

Автоматизована система АСОНИКА (див. рис. 1.6.) призначена для моделювання фізичних процесів у радіоелектронних засобах із врахуванням зовнішніх впливів [114]. За допомогою системи здійснюється автоматизоване проектування та комплексне комп'ютерне моделювання радіоелектронних систем об'єктів у відповідності до вимог CALS-технологій на етапах проектування, виробництва та експлуатації.

АСОНИКА вирішує такі основні проблеми в розробці сучасних PEC:

- попередження можливих умов апаратури при експлуатації на ранніх стадіях проектування;
- скорочення строків та витрат на проектування пристроїв;
- автоматизація документообігу та створення елементарної моделі PEC тощо [114].

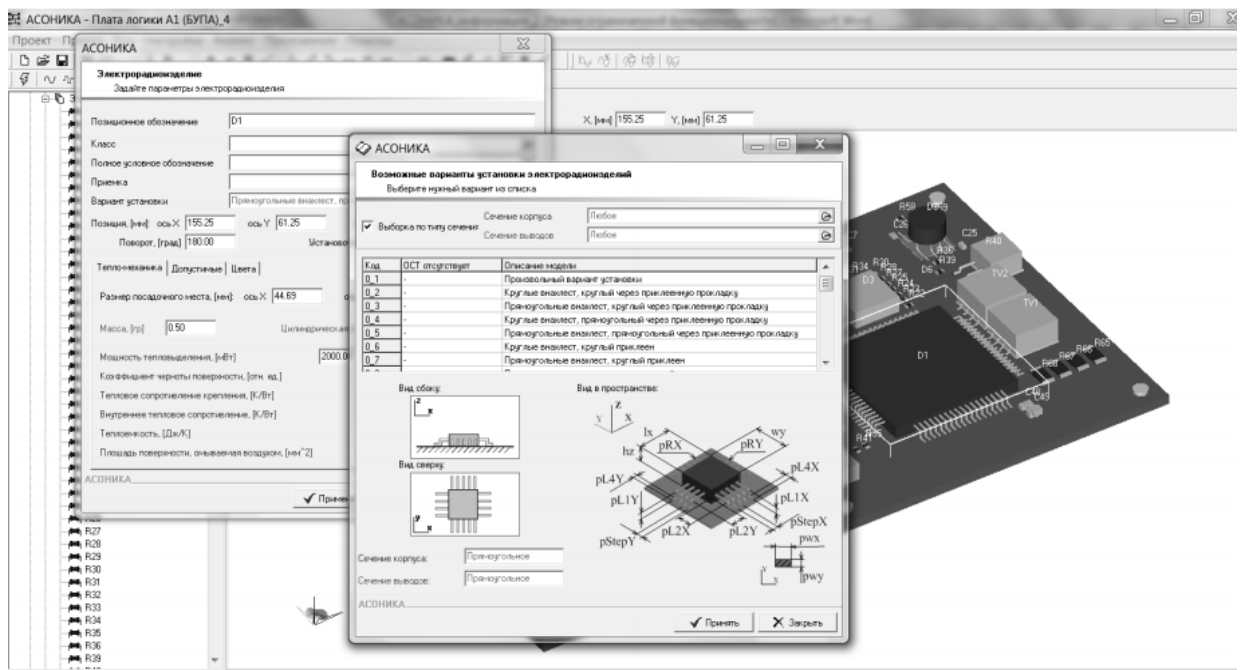


Рис. 1.6. Екранна форма роботи в програмному пакеті АСОНИКА [114]

У даний час автоматизована система АСОНИКА складається з 13 підсистем, які дозволяють моделювати електричні, теплові, аеродинамічні, механічні процеси в апаратурі, здійснювати діагностичне моделювання, аналіз показників надійності тощо.

Зазначені програмні продукти – одні з багатьох, які дозволяють

розв'язувати задачі моделювання та забезпечення функціональної придатності статичних систем. Однак, будучи наділені численними перевагами, ці програмні продукти мають і ряд недоліків, зокрема пряму направленість на вирішення задач аналізу та забезпечення функціональної придатності лише технічних систем. Існують програмні продукти і для вирішення задач аналізу та забезпечення функціональної придатності технологічних процесів, однак вони також розроблені для конкретного виду технології. Насьогодні не існує програмного продукту, який міг би вирішувати поставлені задачі для будь-яких технічних та технологічних систем одночасно.

По-друге, більшість програмних продуктів при розв'язуванні вказаних задач не враховують часових змін параметрів компонентів системи під час експлуатації.

Отже, доцільною є розробка програмного продукту з урахуванням зазначених недоліків на основі методів аналізу інтервальних даних, які дозволяють розв'язувати задачу моделювання та забезпечення функціональної придатності статичних систем із врахуванням часових змін параметрів компонентів системи під час експлуатації.

### **1.5. Інтервальні моделі функціональної придатності статичних систем на основі допускового еліпсоїдного оцінювання**

Розглянуті вище методи дають точкові значення параметрів моделі і додатково потребують виконання операції призначення допуску на параметр та перевірку на функціональну придатність. Однак якщо поставлена задача оцінювання функціональної придатності систем містить достатньо велику кількість параметрів елементів системи та вихідних характеристик, то розглянуті методи будуть мати дуже велику обчислювальну складність. А в задачах забезпечення функціональної придатності, особливо при «яровому» характері вихідних характеристик, існує імовірність недосягнення

локального мінімуму. Тому в таких випадках вихідні дані та допуски на параметри елементів доцільно подавати у вигляді інтервалу, який матиме нижню та верхню межу допустимого значення на параметр чи вихідну характеристику. Допускається, що в межах цих інтервалів система залишатиметься функціонально-придатною.

Тому розглянуті випадки з зазначеними особливостями для свого розв'язку вимагатимуть застосування інших, відмінних від вище описаних, методів, побудованих на інтервальних даних. Вказані методи розвиваються у межах інтервального аналізу або теоретико-множинного підходу [14,23,29].

Коротко розглянемо основні засади інтервального аналізу, необхідні для розв'язку задач аналізу та забезпечення функціональної придатності.

Основна ідея інтервальних обчислень полягає у представленні дійсного числа не одним значенням, а двома, які визначають його нижню та верхню гарантовані межі. При обчисленнях певних функціональних залежностей вихідної характеристики системи від вхідних параметрів із встановленими допусками в інтервальному вигляді необхідним буде виконання основних арифметичних операцій, які в інтервальному вигляді мають визначені правила обчислення. Наприклад, нехай дано два числа  $x$  та  $y$ . Із врахуванням верхньої та нижньої межі гарантованих значень вказані числа набудуть вигляду:  $x = [x^-, x^+]$  та  $y = [y^-, y^+]$ . Основні арифметичні дії мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 [x] + [y] &= [x^-, x^+] + [y^-, y^+] = [x^- + y^-, x^+ + y^+] \\
 [x] - [y] &= [x^-, x^+] - [y^-, y^+] = [x^- - y^+, x^+ - y^-] \\
 [x] \cdot [y] &= [\min\{x^- \cdot y^-, x^- \cdot y^+, x^+ \cdot y^-, x^+ \cdot y^+\}, \max\{x^- \cdot y^-, x^- \cdot y^+, x^+ \cdot y^-, x^+ \cdot y^+\}] \\
 [x]/[y] &= [x^-, x^+] \cdot [1/y^+, 1/y^-]
 \end{aligned}$$

Додатково при виконанні інтервальних обчислень після кожної з представлених арифметичних операцій потрібно робити перевірку для того, щоб нижня межа результуючого інтервалу була меншою за верхню. Для інтервалів також застосовуються операції, притаманні множинам, а саме:

об'єднання, переріз та різниця, – що часто застосовуються у методах пошуку екстремуму (зокрема методі Ньютона).

Властивості інтервальної арифметики загалом описані в праці Алефельда та Херцбергера [4]. Методи аналізу інтервальних даних отримали широке застосування при розв'язанні задач ідентифікації, задач глобальної оптимізації [77,109] тощо. При побудові математичної моделі статичної системи, яку відносять до задач типу «вхід-вихід», виникає задача забезпечення допускових відхилень значень параметрів від номінальних для заданих гарантованих значень виходів (задача забезпечення функціональної придатності) та зворотної задачі аналізу системи.

Із системи (1.3) видно, що кожна  $j$ -та нерівність системи повинна забезпечувати належність значення оціненого значення функції в  $j$ -тій точці експерименту відповідному інтервалу виходу. Якщо дана умова виконується, то це означає сумісність системи та існування принаймні одного розв'язку системи рівнянь.

Кожна нерівність системи (1.3) на площині задає деяку «смугу», обмежену двома межовими лініями, котрі відповідають межам інтервалів вихідної характеристики, як це зображено на рисунку 1.7.

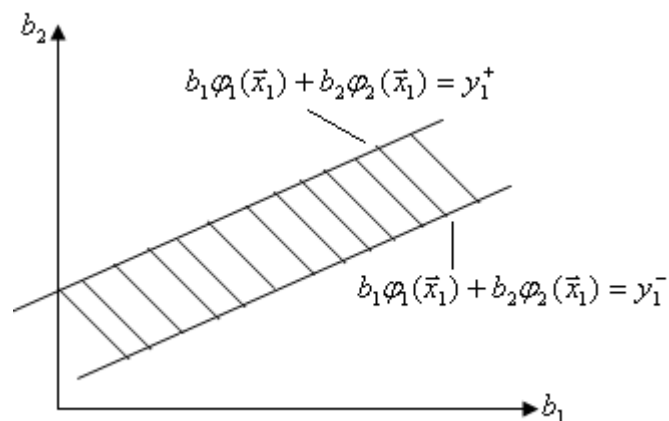


Рис. 1.7. Зображення розв'язків системи інтервальних рівнянь (1.3) у просторі параметрів, коли кількість параметрів рівна 2

За умови сумісності системи при перетині всіх «смуг» у просторі параметрів отримаємо деякий многогранник допустимої області параметрів.

Однак, враховуючи значну складність опису допускової області, отриманої у вигляді багатовимірного многогранника, на практиці часто використовують наближені оцінки допускової області. Одним із таких методів оцінювання допускової області є метод апроксимації області за допомогою  $m$ -вимірного паралелепіпеда [108, 120] з гранями, паралельними осям координат. Цей метод досить широко описаний у працях Шарого С.П. [84-91]. Однак недоліком цього методу є невелике покриття області оцінювання параметрів системи, особливо у випадку значної «втягнутості» допускової області параметрів.

У випадках так званої «втягнутості» допускової області параметрів доцільним є застосування методів оцінювання області параметрів за допомогою допускових еліпсоїдів [5-7,20-22,49,81,82]. Графічне порівняння двох вищезазначених методів оцінювання допускової області параметрів проілюстровано на рисунку 1.8.

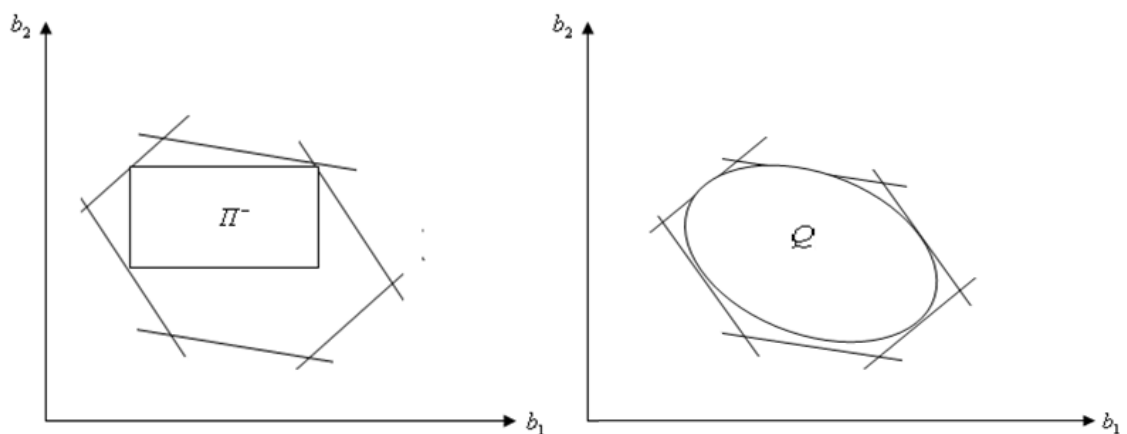


Рис. 1.8. Графічне порівняння допускової оцінки області параметрів методами апроксимації  $m$ -вимірним паралелепіпедом та допусковим еліпсоїдом відповідно

Отже, з рис. 1.8. видно, що допусковий еліпсоїд покриває більшу частину допускової області параметрів у порівнянні з методом апроксимації  $m$ -вимірним паралелепіпедом.

Крім цього, до переваг еліпсоїдного оцінювання допускової області параметрів можна віднести зручність його застосування до оцінювання

функціональної придатності статичних систем. У випадку групового процесу формування значень параметрів, що призводить до їх корельованості, значення параметрів (для випадку нормального закону розподілу) належать довірчій області у вигляді допускового еліпсоїда. Порівняння довірчої області розсіювання параметрів та допустимої області спрощує процедуру оцінювання імовірності функціональної придатності [21,22].

Таким чином, можна зробити висновок, що для встановлення допусків на параметри систем, які поєднують у собі випадкові відхилення параметрів у результаті дії на них випадкових чинників та в результаті похибок заокруглень, які виникають у результаті ітераційних обчислень, доцільно застосовувати методи аналізу інтервальних даних. Показано, що розв'язком системи рівнянь буде допускова область параметрів, яка представляється  $m$ -вимірним многогранником. Доведено, що дану область можна оцінити за допомогою методів апроксимації  $m$ -вимірним паралелепіпедом та методом довірчих еліпсоїдів і наведено їхнє порівняння [49].

Недоліком цих методів є неврахування зміни характеристик системи під час її експлуатації. Наприклад, зміна властивостей хоча б одного з параметрів статичної системи підготовки гіпсоводної суміші в процесі виробництва гіпсокартону, зокрема гіпсу, призведе до зміни вихідних характеристик системи, зокрема в'язкості суміші, і, як результат, до зниження функціональної придатності всієї технічної системи як компоненту цілого технологічного процесу. Отже, необхідною є розробка методу допускового оцінювання функціональної придатності статичної системи з врахуванням часових змін параметрів її компонентів.

## **1.6. Постановка задачі дисертаційного дослідження**

Отже, з вищепроведеного аналізу систем та їх властивостей було встановлено, що саме властивість функціональної придатності систем є найважливішою, а відповідно моделювання та забезпечення функціональної придатності статичних систем є актуальною задачею.



Аналіз методів розв'язування задачі моделювання функціональної придатності показав, що ця задача зводиться до розв'язування системи лінійних алгебричних рівнянь. Вказана СЛАР складається з рівнянь, які описують залежності вихідних характеристик від вхідних параметрів системи. Додатково на вихідні характеристики накладають обмеження, виходячи із фізичних міркувань, і тоді система стає інтервальною. Найбільш придатним методом для аналізу функціональної придатності, який дає можливість отримати модель функціональної придатності у вигляді її ймовірності, є метод допускових еліпсоїдів. Аналіз цього методу показав, що він дозволяє покривати більшу частину допускової області параметрів у порівнянні з іншими. Однак вказані методи не враховують часові зміни параметрів компонентів системи під час експлуатації, що призводить у процесі моделювання до завищених значень функціональної придатності. Тому актуальною є задача моделювання функціональної придатності статичних систем на основі допускового еліпсоїдного оцінювання з врахуванням часових змін параметрів елементів системи.

Аналіз існуючих методів забезпечення функціональної придатності показав, що вони зазвичай ґрунтуються на розв'язуванні системи нелінійних алгебричних рівнянь, однак збіжність їх здебільшого залежить від вигляду цільової функції, кількості параметрів та характеристик системи тощо. У деяких методах досягається лише локальний мінімум. Тому актуальними є розробка методів забезпечення функціональної придатності, які б одночасно враховували обмеження на вихідні характеристики системи та забезпечували оцінювання оптимальних параметрів із їх допусками.

Аналіз існуючих програмних продуктів показав їх вузьконаправлене застосування (більшість із них орієнтована винятково на технічні системи), неврахування допусків на параметри елементів та характеристик системи тощо. Як результат, доцільним є створення уніфікованого програмного забезпечення з відкритим кодом, модульною архітектурою на сучасних мовах програмування, яке можна було б застосовувати під нові різноманітні задачі, а також при нагоді розширювати і на інші класи задач.

Розглянуті методи та програмні продукти не дозволяють або обмежено дозволяють розв'язувати задачу моделювання та забезпечення функціональної придатності систем з врахуванням часових змін параметрів компонентів у процесі експлуатації.

Із вище описаного випливають мета дисертаційного дослідження та задачі для її досягнення. Метою дисертаційного дослідження є розробка універсальних методів, алгоритмів та програмного комплексу для моделювання та забезпечення функціональної придатності статичних систем на основі аналізу інтервальних даних. Для досягнення мети дисертаційного дослідження необхідно розв'язати такі задачі:

- дослідити існуючі підходи та методи для оцінювання функціональної придатності статичних систем для розв'язування задач аналізу та забезпечення функціональної придатності систем;
- розробити метод допускового еліпсоїдного оцінювання функціональної придатності статичних систем, який враховує часові зміни параметрів компонентів;
- розробити метод забезпечення функціональної придатності статичних систем на основі аналізу інтервальних даних, який одночасно враховує обмеження на вихідні характеристики системи та забезпечує оцінювання її оптимальних параметрів;
- розробити метод забезпечення функціональної придатності статичних систем на основі аналізу інтервальних даних, який надає можливість одночасного знаходження оптимальних параметрів статичних систем та їх допусків;
- розробити на основі вищезазначених методів програмний комплекс їх реалізації для моделювання та забезпечення функціональної придатності статичних систем на основі аналізу інтервальних даних;
- провести апробацію розроблених методів на прикладі моделювання та забезпечення функціональної придатності технологічного обладнання лінії з виробництва гіпсокартону в умовах змінних характеристик сировини та для моделювання функціональної придатності радіоелектронних кіл.

## Висновки до першого розділу

1. Розглянуто основні особливості систем, їх класифікації та властивості. Показано, що статична система – це система класу безінерційних систем, вихідні характеристики якої у будь-який момент залежать лише від значень вхідних параметрів системи і її поточного стану. Зв'язок між вхідними параметрами та вихідними характеристиками подається алгебричними рівняннями. Статичні системи мають ряд властивостей, найбільш важливою з яких є функціональна придатність. Обґрунтовано, що для оцінювання функціональної придатності будь-якої статичної системи необхідно розв'язувати задачі аналізу та забезпечення функціональної придатності.
2. Проведено огляд методів для розв'язування задачі аналізу функціональної придатності статичних систем. Установлено, що найбільш придатним для розв'язування цієї задачі є метод довірчих еліпсоїдів. Він ґрунтується на розв'язуванні ІСЛАР та дозволяє ширше покривати допускову область параметрів на відміну від інших методів. Однак не враховує, що в процесі експлуатації параметри компонентів системи змінюватимуть свої значення відносно номінальних. Тому запропоновано розробити метод допускового еліпсоїдного оцінювання функціональної придатності статичних систем, який, на відміну від існуючих, враховував би часову зміну параметрів компонентів системи, що забезпечило б обчислення гарантованих оцінок функціональної придатності статичних систем та підвищило б ступінь адекватності моделей функціональної придатності.
3. Проведено аналіз методів забезпечення функціональної придатності статичних систем. Аналіз показав складність застосування частини з методів до задач зі складною цільовою функцією та до задач великої розмірності. Також ці методи не забезпечують одночасного знаходження оптимальних параметрів статичних систем та їх допусків. Поставлено задачу розробки методу забезпечення функціональної придатності статичних систем на основі аналізу інтервальних даних, який одночасно враховує обмеження на вихідні

характеристики системи та забезпечує оцінювання її оптимальних параметрів і методу забезпечення функціональної придатності статичних, який надає можливість одночасного знаходження оптимальних параметрів статичних систем та їх допусків

4. Проведено аналіз програмних продуктів для розв'язування задач моделювання та забезпечення функціональної придатності статичних систем, який показав вузьконаправленість більшості з них на вирішення вказаних задач лише для технічних систем або спеціалізованих технологічних.

5. Поставлено мету та задачі дисертаційного дослідження, які полягають у розробці універсальних методів, алгоритмів та програмного комплексу для моделювання та забезпечення функціональної придатності статичних систем на основі аналізу інтервальних даних.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ПРИДАТНОСТІ СТАТИЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ДОПУСКОВОГО ЕЛІПСОЇДНОГО ОЦІНЮВАННЯ

У процесі аналізу в попередньому розділі встановлено, що існують методи аналізу функціональної придатності статичних систем, що дають можливість отримати математичну модель функціональної придатності в явному вигляді. Останнім часом найбільшого поширення серед таких методів набули методи допускового еліпсоїдного оцінювання, які ґрунтуються на аналізі інтервальних даних. За певних умов зазначений метод надає можливість визначити функціональну придатність системи як інтегрований показник у вигляді ймовірності функціональної придатності. Проте зазначений метод не дає можливість враховувати часові зміни параметрів компонентів системи.

Численні дослідження у цій сфері доводять, що часові зміни параметрів поряд із випадковою складовою мають деякі закономірності у вигляді детермінованої складової, які необхідно враховувати в процесі аналізу функціональної придатності.

Зважаючи на це, в даному розділі розглянута задача оцінювання та моделювання функціональної придатності статичних систем із врахуванням реальних часових змін параметрів компонентів системи. Матеріали даного розділу опубліковані автором у працях [27,35,51,52,96,97, 101,103,111].

#### **2.1. Метод аналізу та моделювання функціональної придатності статичних систем на основі допускового еліпсоїдного оцінювання**

Розглянемо статичну систему у вигляді чорної скриньки, як це показано на рисунку 2.1.

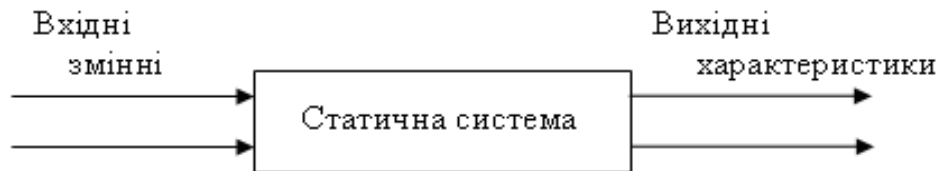


Рис. 2.1. Модель статичної системи у вигляді «чорної скриньки»

Вхідними змінними виступають номінальні значення параметрів елементів статичної системи: наприклад, для радіоелектронної апаратури це є параметри опору, ємності, індуктивності, а для технологічного процесу підготовки гіпсоводної суміші при виробництві гіпсокартону – характеристики гіпсу, коректора, швидкості подачі води, піноутворювача тощо. Вихідними характеристиками у першому випадку, для прикладу, можуть слугувати коефіцієнт загасання на певній частоті, амплітудно-частотна характеристика, напруги та струми на елементах; в іншому випадку – час затвердіння гіпсоводної суміші, величина в'язкості суміші тощо.

Традиційно при встановленні допусків на елементи статичних систем задають обмеження на вихідні характеристики у вигляді:

$$y_i \in [y_i^-, y_i^+], i = 1, \dots, N, \quad (2.1)$$

та встановлюють залежність між значеннями параметрів та відповідними вихідними характеристиками

$$y_i = g_i(\vec{b}), i = 1, \dots, N. \quad (2.2)$$

Вимоги до функціональної придатності статичної системи записують за допомогою нерівності виду:

$$y_i^- \leq g_i(\vec{b}) \leq y_i^+, \quad (2.3)$$

де  $[y_i^-, y_i^+]$  – інтервали вихідних характеристик  $y_i$ , які є допустимими для

функціональної придатності системи. Зазвичай характеристики системи  $g_i(\vec{b})$  є не лінійними. Оскільки функціональна придатність статичної системи визначається в околі номінальних значень параметрів, доцільним є застосувати лінеаризацію характеристик статичної системи і перейти таким чином до лінійної системи нерівностей у вигляді:

$$\delta\vec{Y}^- \leq S \cdot \delta\vec{b} \leq \delta\vec{Y}^+, i=1, \dots, N, \quad (2.4)$$

де  $S_{ij} = b_j \cdot \left. \frac{\delta y_i(\vec{b})}{\delta(b_j)} \right|_{\vec{b}=\vec{b}_0}$  – чутливість  $i$ -ої характеристики системи на зміну параметру  $j$ -го елемента (відома матриця значень похідних функцій  $g_i(\vec{b})$ , які отримують в процесі лінеаризації у точці  $\vec{b}_0$  номінальних значень параметрів);  $\delta\vec{Y}^- = \{\delta y_i^-, i=1, \dots, N\}$ ,  $\delta\vec{Y}^+ = \{\delta y_i^+, i=1, \dots, N\}$  – вектори, складені із верхніх та нижніх меж інтервалів відхилень вихідних характеристик від номінальних;  $\delta b_j = \ln(b_j) - \ln(b_{0j})$  – вектори відносних відхилень параметрів статичної системи від номінальних;

Розв'язок лінійної системи нерівностей (2.4) у просторі параметрів  $\vec{b} \in R^m$  є областю функціональної придатності статичної системи і в той же час є допусковою областю  $\Omega$ .

Розглянемо особливості області функціональної придатності статичної системи:

1. У  $m$ -вимірному просторі параметрів  $b_1, \dots, b_m$  область  $\Omega$  є опуклим многогранником: це означає, що будь-яка точка допускової області є розв'язком системи (2.4).
2. Область  $\Omega$  є областю допускових відхилень  $\delta b_j$  параметрів елементів від номінальних значень. Будь-яке відхилення вектора  $\delta\vec{b}$ , який належить області, забезпечує повну функціональну придатність статичної системи з ймовірністю  $P_d = 1$ .

3. Чим більші розміри допускової області  $\Omega$ , тим ширші допускові інтервали параметрів  $[\delta b_i^-, \delta b_i^+]$ .

Оцінювання функціональної придатності статичної системи означає оцінювання імовірності функціональної придатності  $P_d$  як імовірності належності випадкового вектора  $\vec{\delta b} = (\delta b_1, \dots, \delta b_m)^T$  допусковій області  $\Omega$ . Традиційний підхід до оцінювання імовірності функціональної придатності статичної системи ґрунтується, як зазначалось в першому розділі, на такому співвідношенні:

$$P_d = \int \dots \int_{\Omega} W_{\delta}(y_1, \dots, y_N) dy_1 \dots dy_N, \quad (2.5)$$

де  $W_{\delta}(y_1, \dots, y_N)$ - щільність розподілу випадкового відхилення  $\delta y_i(\vec{b})$  характеристик статичної системи від номінальних.

Задача (2.5) у вигляді обчислення багатовимірного інтеграла є достатньо складною, адже значення  $\delta y_i(\vec{b})$  є корельованими. І, як вже зазначалось вище, застосування традиційних методів, в тому числі і методу Монте-Карло, забезпечують частковий характер розв'язку та зростання обчислювальної складності із збільшенням числа ітерацій і через помилки заокруглення. Тому для оцінювання функціональної придатності у вигляді ймовірності функціональної придатності  $P_d$ , замість формули (2.5), використовуємо інший підхід, який ґрунтується на зіставленні допускової області із технологічною областю розсіювання. Зазначений підхід ґрунтується на теоретико-множинному підході, зокрема на методі аналізу інтервальних даних. Знизити ступінь впливу або й зовсім уникнути вищезазначених недоліків на достовірність розв'язку задачі оцінювання функціональної придатності пристрою дає можливість комбінування методів інтервального аналізу та методу довірчих еліпсоїдів.

Суть методу полягає у побудові допускової області параметрів статичної



системи, при яких система залишається функціонально-придатною на основі аналізу інтервальних даних з подальшим вписуванням у цю область еліпсоїда розсіювання випадкових відхилень вектора параметрів від номінальних значень. Зіставлення допускової області та довірчого еліпсоїда дає можливість кількісно оцінити функціональну придатність системи.

За умови сумісності системи (2.4) областю її розв'язків є область  $\Omega$  параметрів системи у такому вигляді:

$$\Omega = \{ \vec{\delta b} \in R^m \mid \delta \bar{Y}^- \leq S^T \cdot \vec{\delta b} \leq \delta \bar{Y}^+ \}. \quad (2.6)$$

На рисунках 2.2 – 2.4. проілюстровано розв'язок цієї задачі для випадку, коли кількість параметрів більша від кількості характеристик системи ( $m > N$ ), рівна кількості характеристик системи ( $m = N$ ) та менша від кількості характеристик системи ( $m < N$ ).

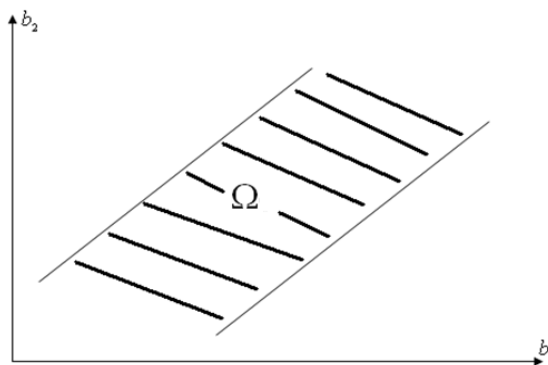


Рис. 2.2. Ілюстрація області  $\Omega$  для випадку  $m = 2, N = 1$

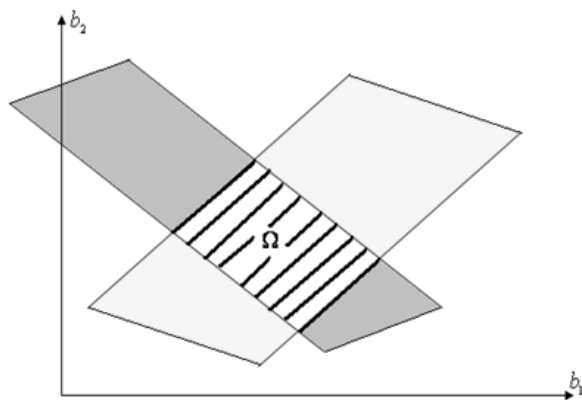


Рис. 2.3. Ілюстрація області  $\Omega$  для випадку  $m = 2, N = 2$

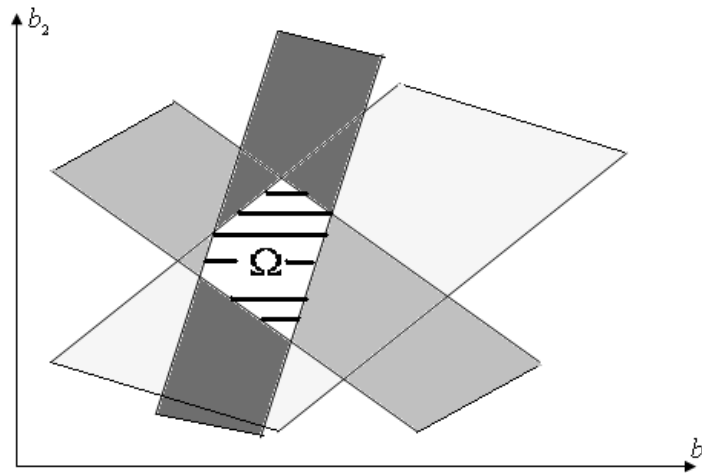


Рис. 2.4. Ілюстрація області  $\Omega$  для випадку  $m = 2, N = 3$

Зважаючи на складність опису області допустимих значень параметрів статичних систем, при збільшенні кількості параметрів та обмежень на характеристики систем доцільно використовувати наближені множинні оцінки цієї області. Проте на практиці кількість обмежень на характеристики статичних систем переважно не перевищує кількості параметрів. За цих умов допускову область параметрів можна довізначати у вигляді паралелотопа (для двовимірного випадку – паралелограм). Таке представлення допускової області для випадку нормального закону розподілу випадкових відхилень параметрів від номінальних значень забезпечує суттєве спрощення аналізу надійності та функціональної придатності системи. Детально розглянемо особливості зазначеного методу.

Нехай випадкові відхилення параметрів системи від номінальних розподілені за нормальним законом. Тоді ці відхилення в  $n$ -вимірному евклідовому просторі  $R^m$  доцільно описати довірчим еліпсоїдом:

$$Q(\alpha, m) = \{ \vec{\delta b} \in R^m \mid (\vec{\delta b} - \vec{\delta \bar{b}})^T \cdot D(\vec{\delta b}) \cdot (\vec{\delta b} - \vec{\delta \bar{b}}) \leq \chi^2(\alpha, m) \}, \quad (2.7)$$

де  $\chi^2(\alpha, m)$  – квантиль  $\chi^2$ -розподілу;  $D^{-1}(\vec{\delta b})$  – коваріаційна матриця випадкового вектора  $\vec{\delta b}$ ;  $\vec{\delta \bar{b}}$  – центр еліпсоїда.

Досить часто інтервали вихідних характеристик системи симетричні відносно своїх номінальних значень, звідси центр симетрії допускової області та еліпсоїда збігаються і знаходяться в нульовій точці, що є необхідним, аби вписаний еліпсоїд дотикався до всіх граней допускової області.

Умовою належності довірчої області до допускової у випадку відомої коваріаційної матриці технологічних чи експлуатаційних відхилень вектора параметрів від номінальних значень буде:

$$\chi^2(\alpha, m) = \frac{1}{\max_{i=1, \dots, m} \{\Lambda'_{ii}\}}, \quad (2.8)$$

із якої функціональну придатність системи визначають як довірчу ймовірність  $\alpha$  для обчисленого значення квантиля  $\chi^2(\alpha, m)$ .

У формулі (2.7)  $\Lambda'_{ii}$  - діагональні елементи матриці :

$$\Lambda' = E^{-1} \cdot S \cdot D^{-1}(\vec{\delta b}) \cdot S^T \cdot E^{-1}. \quad (2.9)$$

Таким чином, метод еліпсоїдів дає можливість в явному вигляді знайти довірчу ймовірність функціональної придатності статичних систем, однак для цього повинні бути виконані наступні умови:

- залежність між вхідними параметрами та вихідними характеристиками повинна задаватись у явному вигляді за допомогою алгебричних рівнянь;
- відхилення параметрів компонентів системи від номінальних значень повинні бути розподілено згідно з нормальним або логарифмічно-нормальним законом розподілу;
- коваріаційна матриця відхилень значень параметрів компонентів системи від номінальних в процесі виробництва повинна бути відомою.

## 2.2. Метод допускового еліпсоїдного оцінювання функціональної придатності статичних систем з урахуванням часових змін параметрів їх компонентів

Як і у випадку аналізу функціональної придатності статичних систем внаслідок технологічних випадкових відхилень параметрів компонентів у процесі їх виготовлення, для випадку врахування часових змін параметрів елементів, випадкові відхилення значень параметрів елементів від номінальних також доцільно описати довірчим еліпсоїдом. Додатково врахування часових змін параметрів компонентів системи в процесі експлуатації будемо моделювати часозалежними функціями зміни значень параметрів компонентів від номінальних протягом певного часу експлуатації системи. У цьому випадку функціональну придатність системи оцінюватимемо виходячи з аналізу допускового еліпсоїда у вигляді:

$$Q(\alpha, m) = \{ \vec{\delta b} \in R \mid (\vec{\delta b} - \vec{\delta b}(t))^T \cdot D(\vec{\delta b}) \cdot (\vec{\delta b} - \vec{\delta b}(t)) \leq \chi^2(\alpha, m) \}, \quad (2.10)$$

де  $\vec{\delta b}(t)$  - вектор з компонентами, які є часозалежними функціями відхилень значень параметрів елементів від їх номінальних значень (від центру еліпсоїда внаслідок процесів зміни параметрів в часі, пов'язаних з дією зовнішнього середовища (старіння елементів, температурні дрейфи тощо)).

За умови заданої коваріаційної матриці ймовірних технологічних відхилень параметрів компонентів від номінальних оцінку ймовірності функціональної придатності отримаємо із розв'язку задачі:

$$\chi^2(\alpha, m) \xrightarrow{\alpha \in [0,1]} \max, Q_s(\alpha, m) \subseteq \Omega. \quad (2.11)$$

На відміну від задачі (2.2), де центри симетрії області допусків та довірчої області розсіювання збігаються, у задачі (2.11) центр довірчого

еліпсоїда є деякою функцією, яка враховує часову зміну значень параметрів компонентів системи.

Знайдемо розв'язок задачі (2.11) в загальному вигляді. Для цього перетворимо довірчий еліпсоїд (2.10) до такого вигляду:

$$Q(\alpha, m) = \left\{ \vec{\delta b} \in R \mid (\vec{\delta b} - \vec{\delta b}(t))^T \cdot \frac{1}{\chi^2(\alpha, m)} \cdot D(\vec{\delta b}) \cdot (\vec{\delta b} - \vec{\delta b}(t)) \leq 1 \right\}. \quad (2.12)$$

Розв'язок задачі (2.11) має чітку графічну інтерпретацію: необхідно знайти таке значення довірчої імовірності  $\alpha$ , щоб уписаний в область допусків  $\Omega$  еліпсоїд (2.12) мав найбільший об'єм. Враховуючи, що центри симетрії області допусків та довірчої області розсіювання не збігаються, то максимальний об'єм еліпсоїда (2.12) буде досягатися у випадку його дотику до однієї або декількох найближчих граней паралелотопа  $\Omega$ .

Далі для отримання розв'язку задачі (2.11) використаємо такий алгоритм. Спочатку отримаємо умови дотику еліпсоїда (2.12) до кожної з  $m$  граней паралелотопа  $\Omega$ , а потім із умови  $Q(\alpha, m) \subseteq \Omega$  обчислимо  $\chi^2(\alpha, m)$ . Очевидно, що зазначена умова виконуватиметься для найближчої до центру еліпсоїда точки дотику до грані.

Користуючись виразом (2.12), знайдемо вирази для векторів-нормалей, дотичних до еліпсоїда у точках дотику  $\vec{\delta b}^i, i = 1, \dots, 2m$  на гранях паралелотопа:

$$\vec{n}_i = \frac{1}{\chi^2(\alpha, m)} D(\vec{\delta b}) \cdot (\vec{\delta b}^i - \vec{\delta b}(t)), i = 1, \dots, 2m. \quad (2.13)$$

З іншого боку, користуючись виразом (2.10), запишемо вектори нормалей до граней паралелотопа, що визначає область допусків  $\Omega$  з нормалізацією до одиничної відстані між центром паралелотопа і його гранями:

$$\vec{n}_i = \vec{S}_i^T / 0,5 \cdot (\delta y_i^+ - \delta y_i^-) = \vec{S}_i^T / \tilde{\Delta}_i, i = 1, \dots, 2m, \quad (2.14)$$

де  $\vec{S}_i$  - вектор-стрічка матриці  $S = \{S_{ij}, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, m}\}$ .

Прирівнявши обидва рівняння, отримаємо формулу умови дотику еліпсоїда (2.14) до кожної з граней многогранника:

$$\frac{1}{\chi^2(\alpha, m)} D(\delta(\vec{b})) \cdot (\delta \vec{b}^i - \delta \vec{b}(t)) = \vec{S}_i^T / \tilde{\Delta}_i, i = 1, \dots, 2m. \quad (2.15)$$

Позначимо за  $\chi^2(\alpha_i, m)$  значення квантиля розподілу, яке забезпечує виконання умови (2.15) для  $i$  – тої грані. Тоді рівняння (2.15) матимуть такий вигляд:

$$\frac{1}{\chi^2(\alpha_i, m)} D(\delta(\vec{b})) \cdot (\delta \vec{b}^i - \delta \vec{b}(t)) = \vec{S}_i^T / \tilde{\Delta}_i, i = 1, \dots, 2m., \quad (2.16)$$

а розв'язок задачі (2.11):

$$\chi^2(\alpha, m) = \min_{i=1, \dots, 2m} \chi^2(\alpha_i, m). \quad (2.17)$$

Перепишемо вирази (2.16), задавши точку грані многогранника  $\delta \vec{b}^i$  у вигляді лінійної комбінації вершин грані:

$$\frac{1}{\chi^2(\alpha_i, m)} D(\delta(\vec{b})) \cdot \left( \sum_{s=1}^{2^{m-1}} \lambda_s^i \cdot \delta \vec{b}_s^i - \delta \vec{b}(t) \right) = \vec{S}_i^T / \tilde{\Delta}_i, i = 1, \dots, 2m. \quad (2.18)$$

Тепер задамо вираз для обчислення координати вершин  $\delta \vec{b}_s$ :

$$\delta \vec{b}_s = S^{-1} \cdot \delta \vec{Y}_s, s = 1, \dots, 2^m. \quad (2.19)$$

де  $\delta\vec{Y}_s$ - вектори, компонентами яких є значення допусків на характеристики пристрою із додатнім  $\tilde{\Delta}_i$  або від'ємним  $-\tilde{\Delta}_i$  знаками.

Підставимо у вирази (2.18) замість  $\delta\vec{b}_s$  вираз (2.19) для їх обчислення, відповідно, отримаємо

$$\frac{1}{\chi^2(\alpha_i, m)} D(\delta(\vec{b})) \cdot (S_m^{-1} \cdot (\sum_{s=1}^{2^{m-1}} \lambda_s^i \cdot \delta\vec{Y}_s^i) - \delta\vec{b}(t)) = \vec{S}_i^T / \tilde{\Delta}_i, i = 1, \dots, 2m. \quad (2.20)$$

Ураховуючи, що вектори  $\delta\vec{Y}_s$  визначають комбінації допусків на характеристики статичної системи, наприклад можуть мати вигляд  $\delta\vec{Y}_s = (\tilde{\Delta}_1, -\tilde{\Delta}_2, \dots, \tilde{\Delta}_i, \dots, -\tilde{\Delta}_m)^T$  і для фіксованого  $i = 1, \dots, 2m$  мають спільну компоненту  $\tilde{\Delta}_i$  або  $-\tilde{\Delta}_i$ , вираз (2.20) перепишемо у такому вигляді:

$$\frac{1}{\chi^2(\alpha_i, m)} D(\delta(\vec{b})) \cdot (S_m^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \sum_{s=1}^{2^{m-1}} \lambda_s^i \cdot \pm \tilde{\Delta}_1 \\ \vdots \\ \tilde{\Delta}_i \\ \vdots \\ \sum_{s=1}^{2^{m-1}} \lambda_s^i \cdot \pm \tilde{\Delta}_m \end{pmatrix} - \delta\vec{b}(t)) = \vec{S}_i^T / \tilde{\Delta}_i, i = 1, \dots, m, \quad (2.21)$$

$$\frac{1}{\chi^2(\alpha_i, m)} D(\delta(\vec{b})) \cdot (S_m^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \sum_{s=1}^{2^{m-1}} \lambda_s^i \cdot \mp \tilde{\Delta}_1 \\ \vdots \\ -\tilde{\Delta}_i \\ \vdots \\ \sum_{s=1}^{2^{m-1}} \lambda_s^i \cdot \mp \tilde{\Delta}_m \end{pmatrix} - \delta\vec{b}(t)) = \vec{S}_i^T / \tilde{\Delta}_i, i = m+1, \dots, 2m. \quad (2.22)$$

Перейдемо тепер до матричної форми у рівняннях (2.21) та (2.22):

$$D(\delta(\vec{b})) \cdot \left( S_m^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \tilde{\Delta}_1 & \cdots & \Lambda_{1i} \cdot \tilde{\Delta}_1 & \cdots & \Lambda_{1m} \cdot \tilde{\Delta}_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Lambda_{i1} \cdot \tilde{\Delta}_i & \cdots & \tilde{\Delta}_i & \cdots & \Lambda_{im} \cdot \tilde{\Delta}_i \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Lambda_{m1} \cdot \tilde{\Delta}_m & \cdots & \Lambda_{mi} \cdot \tilde{\Delta}_m & \cdots & \tilde{\Delta}_m \end{pmatrix} - B_\Delta(t) \right) \cdot X^{-1} = S_m \cdot E^{-1}, i = 1, \dots, m \quad (2.23)$$

$$D(\delta(\vec{b})) \cdot \left( S_m^{-1} \cdot \begin{pmatrix} -\tilde{\Delta}_1 & \cdots & -\Lambda_{1i} \cdot \tilde{\Delta}_1 & \cdots & -\Lambda_{1m} \cdot \tilde{\Delta}_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\Lambda_{i1} \cdot \tilde{\Delta}_i & \cdots & -\tilde{\Delta}_i & \cdots & -\Lambda_{im} \cdot \tilde{\Delta}_i \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\Lambda_{m1} \cdot \tilde{\Delta}_m & \cdots & -\Lambda_{mi} \cdot \tilde{\Delta}_m & \cdots & -\tilde{\Delta}_m \end{pmatrix} - B_\Delta(t) \right) \cdot X'^{-1} = S_m \cdot E^{-1}, i = m+1, \dots, 2m \quad (2.24)$$

де  $\Lambda_{ji} = \sum_{s=1}^{2^{m-1}} \lambda_s^i \cdot \frac{\Delta_j^s}{\tilde{\Delta}_j}$ ,  $\Delta_j^s \in \{-\tilde{\Delta}_j, \tilde{\Delta}_j\}$ ,  $j = 1, \dots, m$ ;

$X = \text{diag}\{\chi^2(\alpha_1, m), \dots, \chi^2(\alpha_i, m), \dots, \chi^2(\alpha_m, m), i = 1, \dots, m\}$  – діагональна матриця значень  $\chi^2(\alpha_i, m)$  квантиля розподілу, яке забезпечує виконання умови (2.15) для  $i = 1, \dots, m$  – тої грані;

$X' = \text{diag}\{\chi^2(\alpha_{m+1}, m), \dots, \chi^2(\alpha_{m+i}, m), \dots, \chi^2(\alpha_{2m}, m), i = m+1, \dots, 2m\}$  – діагональна матриця значень  $\chi^2(\alpha_i, m)$  квантиля розподілу, яке забезпечує виконання умови (2.15) для  $i = m+1, \dots, 2m$  – тої грані;

$B_\Delta(t) = (\vec{\delta b}(t) \ \cdots \ \vec{\delta b}(t))$  – матриця розмірності  $m \times m$ , стовпці якої є векторами з компонентами - часозалежними функціями відхилень значень параметрів елементів від їх номінальних значень.

Позначимо

$$\Lambda = \begin{pmatrix} 1 & \cdots & \Lambda_{1i} & \cdots & \Lambda_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Lambda_{i1} & \cdots & 1 & \cdots & \Lambda_{im} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Lambda_{m1} & \cdots & \Lambda_{mi} & \cdots & 1 \end{pmatrix}$$



Тоді системи (2.23) та (2.24) набудуть такого вигляду:

$$D(\delta(\vec{b})) \cdot (S_m^{-1} \cdot E \cdot \Lambda - B_\Delta(t)) \cdot X^{-1} = S_m \cdot E^{-1}, i = 1, \dots, m, \quad (2.25)$$

$$D(\delta(\vec{b})) \cdot (-S_m^{-1} \cdot E \cdot \Lambda - B_\Delta(t)) \cdot X'^{-1} = S_m \cdot E^{-1}, i = m + 1, \dots, 2m. \quad (2.26)$$

Розв'язавши системи (2.25) та (2.26), відносно діагональних матриць  $X$  та  $X'$  відповідно,

$$\begin{aligned} X &= E \cdot S_m^{-1} \cdot D(\delta(\vec{b})) \cdot (S_m^{-1} \cdot E \cdot \Lambda - B_\Delta(t)), i = 1, \dots, m, \\ X' &= E \cdot S_m^{-1} \cdot D(\delta(\vec{b})) \cdot (-S_m^{-1} \cdot E \cdot \Lambda - B_\Delta(t)), i = m + 1, \dots, 2m, \end{aligned} \quad (2.27)$$

кінцевий розв'язок задачі (2.11) отримаємо за формулою (2.17), де  $\chi^2(\alpha_i, m)$  - діагональні елементи матриць  $X$  та  $X'$  (2.27).

Таким чином, для розв'язання задачі аналізу функціональної придатності статичних систем обґрунтовано використання методу довірчих еліпсоїдів. Показано, що відомі методи допускового оцінювання на основі аналізу інтервальних даних дають дещо завищені оцінки функціональної придатності систем за рахунок неврахування часових змін параметрів компонентів системи під час її експлуатації. Тому запропоновано розробити метод допускового еліпсоїдного оцінювання функціональної придатності статичних систем, який, на відміну від існуючих, враховував би часову зміну параметрів компонентів системи. У результаті застосування методу для розв'язування задачі аналізу функціональної придатності забезпечило обчислення гарантованих оцінок функціональної придатності статичних систем та підвищило ступінь адекватності моделей.

### 2.3. Порівняльний аналіз обчислювальної складності реалізації методів Монте-Карло та допускового еліпсоїдного оцінювання

Для порівняння обчислювальної складності реалізації методу Монте-Карло та методу аналізу і моделювання функціональної придатності статичних систем на основі допускового еліпсоїдного оцінювання розглянемо приклад оцінки функціональної придатності фільтра нижніх частот з паралельно з'єднаними елементами, схема якого наведена на рисунку 2.5. Номінальні значення резистора  $R_0 = 0,5\text{кОм}$  та конденсатора  $C_0 = 0,5\text{мкФ}$ . Номінальні значення модуля коефіцієнта передачі розглянуто на двох частотах:  $f_1 = 1000\text{Гц}$ ,  $f_2 = 2000\text{Гц}$ . Вимогою до функціональної придатності фільтра є допустиме відхилення модуля коефіцієнта передачі в межах 15% від номінального значення на вказаних частотах.

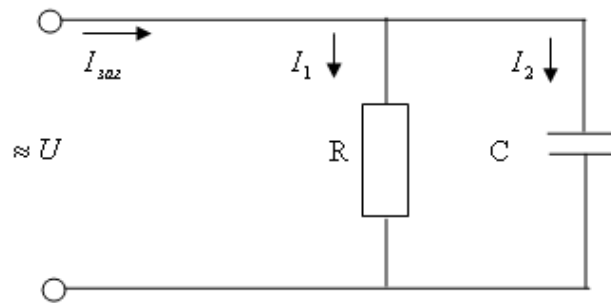


Рис. 2.5. Схема фільтра нижніх частот.

Амплітудно-частотна характеристика для номінальних значень параметрів елементів фільтра нижніх частот має такий вигляд:

$$|K| = \frac{1 + R^2 \omega^2 C^2}{R^2 + \omega^2 C^2} \Rightarrow K_{oi} = \sqrt{\frac{1 + R^2 \omega^2 C^2}{R^2 + \omega^2 C^2}} \quad (2.28)$$

Користуючись виразом (2.28), який описує вимоги до функціональної придатності фільтра, складемо таблицю результатів обчислення модуля

коефіцієнта передачі для двох частот та допустимого відхилення цього модуля від номінального значення.

Таблиця 2.1

## Результати обчислення модуля коефіцієнта передачі

$i$	$f_i$	$K_{0i}$	$K_{0i}^-$	$K_{0i}^+$	$\delta K_i^-$	$\delta K_i^+$
1	1000	0,0037	0,0032	0,0043	-0,00056	0,00056
2	2000	0,0066	0,0056	0,0076	-0,00099	0,00099

Ураховуючи нелінійність характеристики фільтра за параметрами, проведемо її лінеаризацію в околі номінальних значень параметрів та визначимо чутливість характеристик фільтра на зміну параметрів у вигляді матриці  $S$ :

$$S = \begin{pmatrix} -0,0011 & 0,0026 \\ -0,0006 & 0,006 \end{pmatrix}. \quad (2.29)$$

Користуючись таблицею 2.1, обчислимо діагональну матрицю  $E$ :

$$E = \begin{pmatrix} 0,00056 & 0 \\ 0 & 0,00099 \end{pmatrix}. \quad (2.30)$$

Виходячи з формули (2.4), складемо систему нерівностей:

$$\begin{pmatrix} -0,00056 \\ -0,00099 \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} -0,0011 & 0,0026 \\ -0,0006 & 0,006 \end{pmatrix} \cdot \vec{\delta b} \leq \begin{pmatrix} 0,00056 \\ 0,00099 \end{pmatrix}, \quad (2.31)$$

де  $\vec{\delta b} = (\delta R, \delta C)^T$ .

Тепер задамо коваріаційну матрицю відхилень параметрів

радіоелементів від номінальних (у процесі виготовлення):

$$D^{-1}(\delta\vec{b}) = \begin{pmatrix} 0,16 & 0,04 \\ 0,04 & 0,012 \end{pmatrix}. \quad (2.32)$$

Необхідно зауважити, що діагональними елементами коваріаційної матриці є дисперсії відносних відхилень значень параметрів фільтра від номінальних.

З метою проведення порівняльного аналізу обчислювальної складності вищезгаданих методів розроблено їх алгоритмічні реалізації із застосуванням мови програмування C#. У результаті реалізації методу аналізу і моделювання функціональної придатності статичних систем на основі допускового еліпсоїдного оцінювання за формулами (2.4, 2.6) встановлено значення квантиля:  $\chi^2(\alpha, m) = 4,84$ . Користуючись таблицями  $\chi^2$ -розподілу, встановлюємо ймовірність функціональної придатності РЕК у розмірі  $P = 94\%$ .

Слід зауважити, що зазначений метод дає точне значення ймовірності функціональної придатності статичної системи.

Далі для оцінювання функціональної придатності застосовували метод Монте-Карло. На рисунку 2.6 графічно зображено результати застосування методу Монте-Карло. Установлено ймовірність функціональної придатності фільтра нижніх частот у розмірі  $P = 94,1\%$ . При цьому кількість згенерованих випадкових чисел становить близько 500 тис.

Зіставлення результатів застосування методу Монте-Карло та методу аналізу і моделювання функціональної придатності статичних систем на основі допускового еліпсоїдного оцінювання для оцінювання функціональної придатності фільтра нижніх частот графічно проілюстровано на рисунку 2.7.

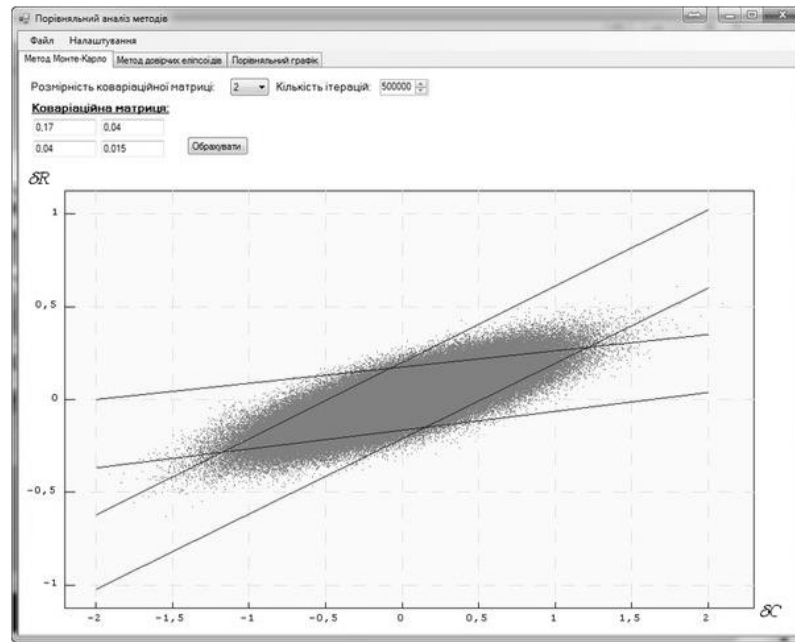


Рис. 2.6. Приклад генерації довільних випадкових чисел згідно нормального закону розподілу

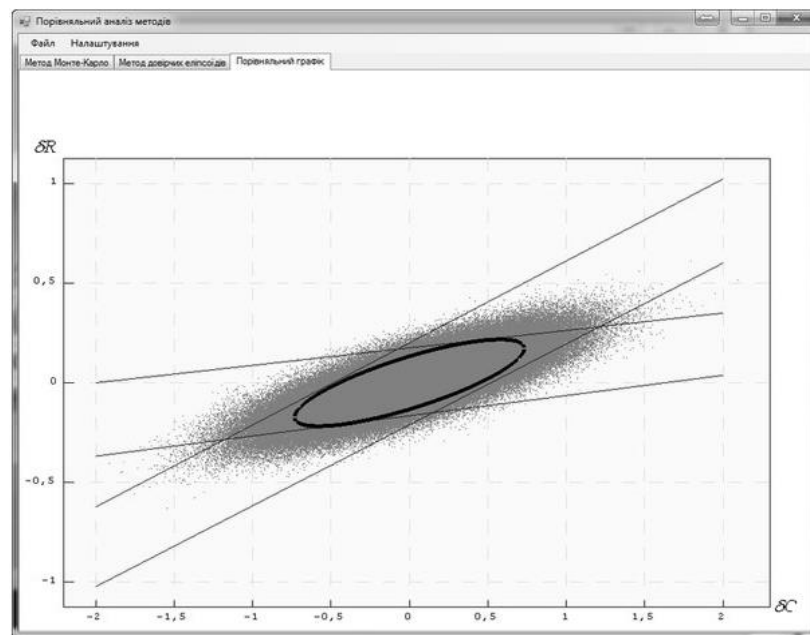


Рис. 2.7. Ілюстрація до порівняння двох методів.

Жирною лінією зображено довірчий еліпсоїд (2.7), отриманий для квантиля  $\chi^2(\alpha, m) = 4,84$ . Як бачимо, еліпсоїд знаходиться в межах допускової області, яка утворюється внаслідок перетину смуг, визначених попарно паралельними прямими і є допусковою областю параметрів.

Досягнута точність для оцінювання імовірності функціональної придатності для обох методів є однаковою.

Тепер порівняємо обчислювальну складність обох методів.

Для реалізації обох методів використовувався ПК: Тип комп'ютера - ACPI x64-based PC (Mobile), тип процесора - Mobile DualCore Intel Core i5-2410M, 2655 MHz (27 x 98), назва системної плати - Mobile DualCore Intel Core i5-2410M, 2655 MHz (27 x 98), чіпсет системної плати - Intel Cougar Point HM67, Intel Sandy Bridge, системна пам'ять - 8106 MB (DDR3-1333 DDR3 SDRAM). У методі Монте-Карло, для генерування близько 500 тис. точок було затрачено близько 13,5 секунд. Для досягнення цієї ж точності при реалізації методу аналізу й моделювання функціональної придатності статичних систем на основі допускового еліпсоїдного оцінювання на зазначеному ПК було затрачено близько 0,6 секунд, що в 22 рази менше, ніж у методі Монте-Карло.

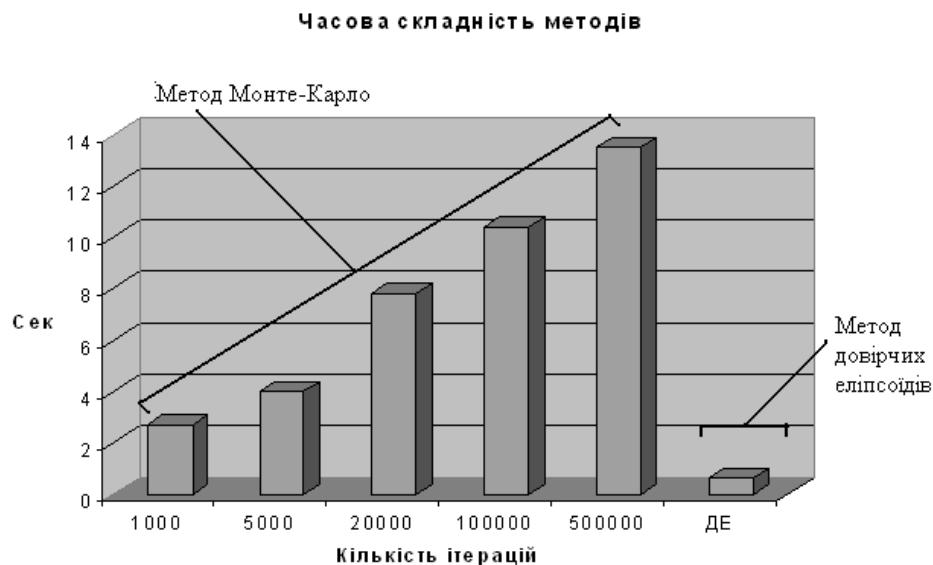


Рис. 2.8. Порівняння часової складності реалізації методу Монте-Карло та методу довірчих еліпсоїдів

На рисунку 2.8. наведена стовпчикова діаграма, яка показує зміну часової складності реалізації методу Монте-Карло в залежності від кількості згенерованих точок. На цій же діаграмі для порівняння показано часову

складність для методу аналізу і моделювання функціональної придатності статичних систем на основі допускового еліпсоїдного оцінювання. Як бачимо, навіть у випадку генерування в методі Монте-Карло 1 тис. точок обчислювальна складність його реалізації буде вищою в порівнянні з методом аналізу і моделювання функціональної придатності статичних систем на основі допускового еліпсоїдного оцінювання.

#### 2.4. Приклад застосування методу допускового еліпсоїдного оцінювання функціональної придатності систем з урахуванням часових змін параметрів їх компонентів

Дано фільтр нижніх частот з послідовно з'єднаними елементами. Задамо номінальні значення параметрів елементів:  $R_0 = 0,5 \text{кОм}$ ,  $C_0 = 0,5 \text{мкФ}$ . Номінальні значення модуля коефіцієнта передачі розглянемо на двох частотах:  $f_1 = 1000 \text{Гц}$ ,  $f_2 = 2000 \text{Гц}$ . Задамо вимогу для функціональної придатності фільтра (див. рис. 2.9.): вважаємо, що фільтр є функціонально придатним, якщо відхилення модуля коефіцієнта передачі від його значень, обчислених для номінальних значень параметрів на вказаних частотах, буде в межах  $\pm 15\%$ .

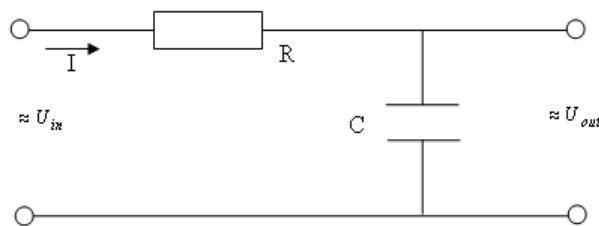


Рис. 2.9. Схема фільтра нижніх частот

Розрахуємо амплітудно-частотну характеристику даного фільтра:

$$U_{in} = I \cdot R_{all}. \quad (2.33)$$

Величина, що пов'язує струм і напругу на конденсаторі, є реактивним опором, який для ємнісного опору представляється рівнянням:

$$X_c = \frac{1}{j\omega C}, \quad (2.34)$$

де  $\omega$  – кутова частота,  $\omega = 2\pi f$ ;  $f$  – частота в герцах;  $j$  – уявна одиниця,  $j = \sqrt{-1}$ .

При послідовному з'єднанні в колі резистора та конденсатора загальний опір буде дорівнювати:

$$R_{all} = R + X_c \quad (2.35)$$

$$U_{out} = I \cdot X_c \quad (2.36)$$

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{X_c}{R + X_c} = \frac{1}{j\omega CR + 1} \quad (2.37)$$

$$|K| = \sqrt{\frac{1}{\omega^2 C^2 R^2 + 1}} \quad (2.38)$$

Ураховуючи нелінійність характеристики фільтра за параметрами, проведемо її лінеаризацію за логарифмічними значеннями параметрів в околі точки  $(\ln(b_{o1}), \dots, \ln(b_{om}))$  та визначимо чутливість характеристик фільтра на зміну параметрів у вигляді:

$$\partial K_i^- \leq \sum_{j=1}^m S_{ij} \cdot \partial b_j \leq \partial K_i^+, i = 1, \dots, N, \quad (2.39)$$

де  $S_{ij} = b_j \cdot \left. \frac{\partial K_i(\vec{b})}{\partial(b_j)} \right|_{\vec{b}=\vec{b}_0}$  – чутливість  $i$ -ої характеристики фільтра на зміни

значення  $j$ -того параметра елементів,  $\partial b_j = \ln(b_j) - \ln(b_{oj})$ ,  $\partial K_i^- = K_i^- - K_{0i}$ ,

$\partial K_i^+ = K_i^+ - K_{0i}$ ,  $\partial b_j = (\partial R_0, \partial C_0)$ .

Перевагами розкладу за логарифмічними змінними є те, що при малих



значеннях  $\delta b_j$  воно наближається до значення відносного відхилення параметра  $b_j$  від номінального і розподілене згідно з нормальним законом.

$$S_{iR} = R_0 \cdot \left. \frac{\partial K_i}{\partial R} \right|_{b_0} = - \frac{R^2 C^2 w^2}{\sqrt{(w^2 C^2 R^2 + 1)^3}}, \quad (2.40)$$

$$S_{iC} = C_0 \cdot \left. \frac{\partial K_i}{\partial C} \right|_{b_0} = - \frac{R^2 C^2 w^2}{\sqrt{(w^2 C^2 R^2 + 1)^3}}. \quad (2.41)$$

У матричному вигляді функція чутливості набуде вигляду:

$$S = \begin{pmatrix} -0,3822 & -0,3822 \\ -0,2755 & -0,2755 \end{pmatrix}. \quad (2.42)$$

Обчислимо за формулою діагональну матрицю  $E$ :

$$E = \begin{pmatrix} 0,0806 & 0 \\ 0 & 0,0455 \end{pmatrix}. \quad (2.43)$$

Задамо коваріаційну матрицю імовірних технологічних відхилень параметрів радіоелементів від номінальних:

$$D^{-1}(\delta \vec{b}) = \begin{pmatrix} 0,16 & 0,04 \\ 0,04 & 0,012 \end{pmatrix}. \quad (2.44)$$

При оцінюванні функціональної придатності пристрою на основі аналізу технологічних відхилень параметрів компонентів у процесі їх виготовлення, коли останні розподілені за нормальним законом розподілу, довірчий еліпс, представлений виразом (2.12), співпадає з центром допускової області (див.рис. 2.10.).

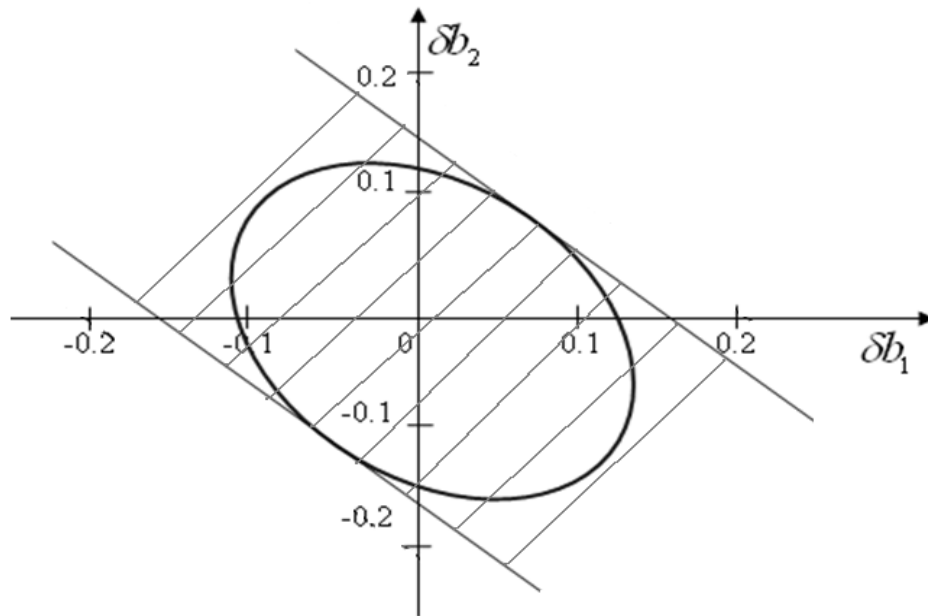


Рис. 2.10. Ілюстрація довірчого еліпса

Для реалізації методу аналізу і моделювання функціональної придатності статичних систем на основі допускового еліпсоїдного оцінювання скористаємось формулами (2.8-2.9) для пошуку квантиля  $\chi^2$ -розподілу.

$$\Lambda' = \begin{pmatrix} 12,409 & 0 \\ 0 & 21,969 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -0,3822 & -0,3822 \\ -0,2755 & -0,2755 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0,16 & 0,04 \\ 0,04 & 0,012 \end{pmatrix} \times \\ \times \begin{pmatrix} -0,3822 & -0,2755 \\ -0,3822 & -0,2755 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 12,409 & 0 \\ 0 & 21,969 \end{pmatrix} \quad (2.45)$$

У результаті встановлено значення квантиля:  $\chi^2(\alpha, m) = 4,94$ . Користуючись таблицями  $\chi^2$ -розподілу, встановлюємо ймовірність функціональної придатності фільтра у розмірі  $P = 94\%$ .

Як було зазначено вище, співвідношення (2.11-2.12) дають завищену оцінку ймовірності функціональної придатності, адже тут не враховуються часові зміни параметрів компонентів системи, які знижують імовірність функціональної придатності фільтра. Тому доцільно застосувати *метод*

допускового еліпсоїдного оцінювання функціональної придатності статичних систем з урахуванням часих змін параметрів їх компонентів.

Важливою умовою для оцінювання функціональної придатності пристрою методом довірчих еліпсоїдів із врахуванням часових змін параметрів компонентів є необхідність виконання умови (2.16) дотику еліпсоїда хоча б до одної з граней допускової області.

$$\frac{1}{\chi^2(\alpha, m)} \cdot \begin{pmatrix} 37,5 & -125 \\ -125 & 500 \end{pmatrix} \cdot (\delta \vec{b}^i - \delta \vec{b}(t)) = \begin{pmatrix} -4,74 & -8,4 \\ -3,41 & -6,05 \end{pmatrix}, i = 1, \dots, 2m. \quad (2.46)$$

Розглянемо випадок, коли резистор у результаті часових змін параметрів досягне відхилення параметрів від номінальних значень у розмірі 5%, а відсоток відхилення параметрів конденсатора змінюватиметься від 2% до 8%. Результат зміни оцінки функціональної придатності фільтра, описаної за допомогою довірчого еліпса (2.12), представлений на рисунку 2.11.

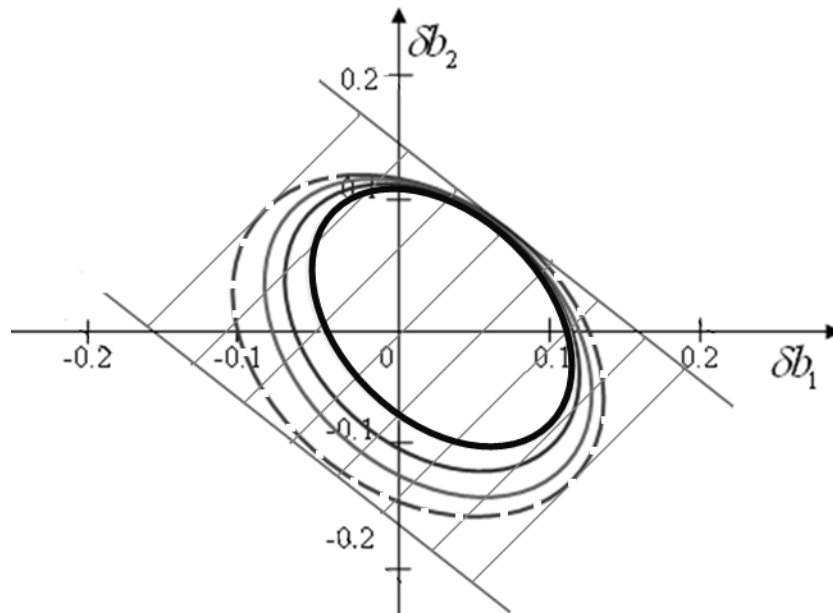


Рис. 2.11. Ілюстрація зміни площі довірчого еліпса при зміні відхилень на параметри компонентів РЕК протягом певного часу експлуатації пристрою

У результаті, як це можна побачити з рисунку 2.11, імовірність

функціональної придатності фільтра, яку оцінюємо за допомогою довірчих еліпсів, буде з кожним наступним відрізком часу експлуатації пристрою зменшуватися. На рисунку 2.11. довірчий еліпс найбільшого об'єму, зображений пунктирною лінією, оцінює функціональну придатність фільтра  $P = 96\%$  при умові відхилення значень параметрів елементів від номінальних значень у розмірі  $B_{\Delta}(t) = (0,05 \ 0,02)$ , довірчий еліпс другого за розміром об'єму оцінює функціональну придатність фільтра у розмірі  $P = 81\%$  за умови, що  $B_{\Delta}(t) = (0,05 \ 0,04)$ , довірчий еліпс третього за розміром об'єму відповідно оцінює функціональну придатність фільтра у розмірі  $P = 65\%$  при умові, що  $B_{\Delta}(t) = (0,05 \ 0,06)$  і довірчий еліпс найменшого об'єму, зображений жирною лінією, оцінює функціональну придатність фільтра у розмірі  $P = 54\%$  при умові, що  $B_{\Delta}(t) = (0,05 \ 0,08)$ . Із збільшенням відсотка відхилення параметрів елементів від номінальних значень у кілька разів зменшується ймовірність функціональної придатності фільтра, що в результаті спричинить вихід пристрою з ладу.

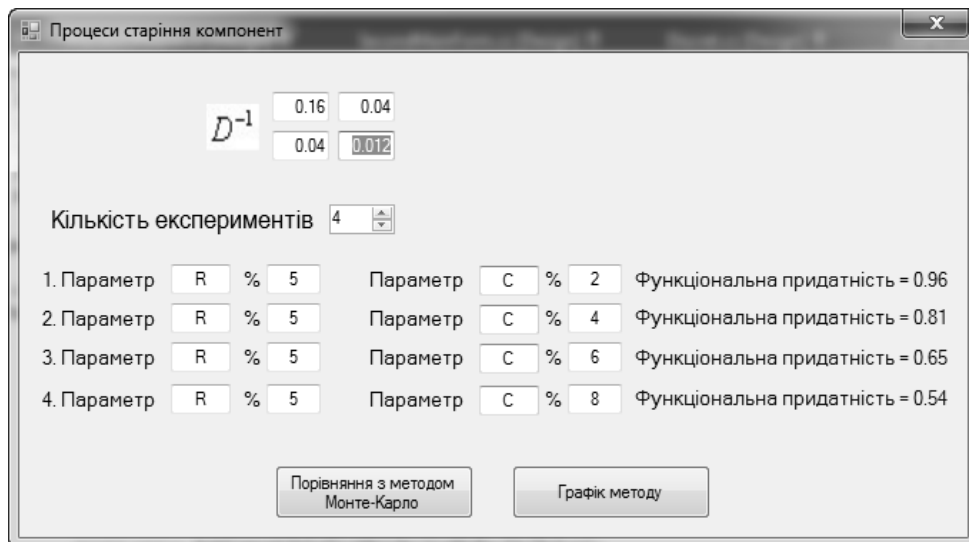


Рис. 2.12. Форма визначення функціональної придатності з врахуванням часових змін параметрів компонентів

На рисунку 2.12. наведена екранна форма програмного комплексу розв'язування задачі аналізу оцінювання функціональної придатності

пристрою на основі *методу допускового еліпсоїдного оцінювання функціональної придатності статичних систем з урахуванням часих змін параметрів їх компонентів.*

Таким чином, можна зробити висновок щодо переваги методу допускового еліпсоїдного оцінювання функціональної придатності статичних систем з урахуванням часових змін параметрів їх компонентів над наближеними методами, зокрема методом Монте-Карло. Адже навіть при оцінці функціональної придатності системи, яка складається лише з двох параметрів і без врахування відхилень значень параметрів компонентів системи від номінальних під час експлуатації, обчислювальна складність методу Монте-Карло у 22 рази вища. На практиці ж оцінюватимуть функціональну придатність статичних систем, які складаються із значно більшої кількості параметрів, ніж у тестовому прикладі. Другою вагомою перевагою *методу допускового еліпсоїдного оцінювання функціональної придатності статичних систем* є урахування часових змін параметрів компонентів системи, які виникатимуть під час експлуатації системи.

## Висновки до другого розділу

1. Розглянуто задачу аналізу функціональної придатності статичних систем. Визначено, що для її розв'язання доцільно застосовувати метод допускового оцінювання на основі аналізу інтервальних даних, який дає можливість в явному вигляді знайти довірчу ймовірність функціональної придатності статичних систем. Для цього система повинна задовільняти певні вимоги, зокрема залежність між вхідними параметрами та вихідними характеристиками повинна задаватися в явному вигляді за допомогою алгебричних рівнянь та відхилення параметрів компонентів системи від номінальних повинні підлягати нормальному або логарифмічно-нормальному закону розподілу.

2. Показано, що метод аналізу і моделювання функціональної придатності статичних систем на основі допускового еліпсоїдного оцінювання дає дещо завищену оцінку функціональної придатності систем, адже не враховує часові зміни параметрів компонентів системи під час її експлуатації.

3. Запропоновано та обґрунтовано метод допускового еліпсоїдного оцінювання функціональної придатності статичних систем, який, на відміну від існуючих, враховує часову зміну параметрів компонентів системи, що забезпечує обчислення гарантованих оцінок функціональної придатності статичних систем та підвищення ступеня адекватності моделей функціональної придатності.

4. Проведено порівняльний аналіз обчислювальної складності реалізації методу Монте-Карло та методу аналізу і моделювання функціональної придатності статичних систем на основі допускового еліпсоїдного оцінювання. На конкретному прикладі оцінювання функціональної придатності фільтра нижніх частот показано, що для забезпечення однакової точності часова складність реалізації методу Монте-Карло переважає часову складність реалізації методу аналізу і моделювання функціональної

придатності статичних систем на основі допускового еліпсоїдного оцінювання у 22 рази.

5. На прикладі оцінювання функціональної придатності фільтра нижніх частот методом допускового еліпсоїдного оцінювання функціональної придатності статичних систем з урахуванням часових змін параметрів їх компонентів показано, як із збільшенням часу експлуатації пристрою та із збільшенням відсотка зношеності (старіння) компонентів пристрою зменшується ймовірність його функціональної придатності.

### РОЗДІЛ 3

## МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ПРИДАТНОСТІ СТАТИЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ІНТЕРВАЛЬНИХ ДАНИХ

При проектуванні та дослідженні статичних систем доводиться розв'язувати як задачі аналізу, так і задачі забезпечення функціональної придатності. Задача аналізу – визначення характеристик статичних систем за відомою схемою і параметрами елементів, а задача забезпечення функціональної придатності – визначення схеми та параметрів статичної системи за заданими її характеристиками.

У традиційній постановці задачу забезпечення функціональної придатності системи математично формулюють як оптимізаційну задачу, в якій цільова функція містить вимоги до характеристик системи. Однак достатньо часто розв'язок задачі забезпечення функціональної придатності як нелінійної оптимізаційної задачі не може бути імплементований в практичній реалізації. За цих умов доцільно функцію мети задачі забезпечення функціональної придатності будувати, виходячи із заданих обмежень на значення вихідних характеристик. У такій постановці задачу забезпечення функціональної придатності можна розв'язувати методом аналізу інтервальних даних.

Водночас при розв'язуванні такої задачі з одночасним забезпеченням функціональної придатності статичної системи необхідно обчислити параметри елементів системи у такий спосіб, щоб із врахуванням їх відхилень, які задаються допусками, забезпечити функціональну придатність системи. Зазначені задачі мають надзвичайну практичну цінність. Насьогодні такі задачі не тільки не розв'язувались, але і їх постановки відсутні у літературі через їх надзвичайно велику обчислювальну складність. Зважаючи на вищезазначене, в цьому розділі розглянемо задачу забезпечення функціональної придатності статичної системи за умов відомих залежностей



між вихідними характеристиками та параметрами і розробимо метод забезпечення функціональної придатності статичних систем на основі аналізу інтервальних даних, який одночасно враховує обмеження на вихідні характеристики системи та забезпечує оцінювання її оптимальних параметрів та метод забезпечення функціональної придатності статичних систем на основі аналізу інтервальних даних, який надає можливість одночасного знаходження оптимальних параметрів статичних систем та їх допусків.

Зазначена задача вимагає для її розв'язання застосувати методи оптимізації, зокрема методи випадкового пошуку. Однак ці методи не застосовувались для розв'язування задачі забезпечення функціональної придатності статичних систем, яка має певну специфіку: система інтервальних рівнянь цієї задачі є моделлю забезпечення функціональної придатності. Тому в цьому розділі проведено обґрунтування вибору найкращого методу випадкового пошуку і на цій основі проведено його удосконалення.

Матеріали даного розділу опубліковано у працях [50,53,74,102].

### **3.1. Метод забезпечення функціональної придатності статичних систем з оптимізацією їх параметрів на основі аналізу інтервальних даних**

Спочатку розглянемо постановку задачі забезпечення функціональної придатності статичної системи із врахуванням обмежень на її характеристики, які переважно є не лінійними за параметрами.

Характеристиками системи для прикладу радіоелектронного кола можуть бути коефіцієнти підсилення та згасання на певній частоті, струми та напруги на ділянках кола тощо. У такому випадку кожна  $i$ -та характеристика  $y_i$  РЕК є функцією параметрів  $\vec{b} = (b_1, \dots, b_j, \dots, b_m)^T$  елементів. Здебільшого при дослідженні функціонування пристроїв використовують нелінійні залежності вихідних характеристик пристрою від його параметрів,

тобто кожна  $i$ -та характеристика  $y_i$ ,  $i = 1, \dots, N$  є функцією  $g_i(\vec{b})$  векторного аргумента параметрів  $\vec{b} = (b_1, \dots, b_m)^T$ . Зважаючи на задані допуски на характеристики системи, при забезпеченні функціональної придатності доцільно вихідні характеристики системи подавати в інтервальному вигляді:

$$[y_i^-, y_i^+], i = 1, \dots, N. \quad (3.1)$$

У випадку відомих залежностей  $g_i(\vec{b})$  між значеннями параметрів та вихідними характеристиками пристрою та із урахуванням обмежень (3.1) отримаємо:

$$y_i^- \leq g_i(\vec{b}) \leq y_i^+, i = 1, \dots, N, \quad (3.2)$$

де  $[y_i^-, y_i^+]$ - інтервали обмежень на значення вихідної характеристики системи.

Згідно з системою (3.2), умови забезпечення функціональної придатності сформулюємо у такому вигляді:

$$g_i(\hat{b}) \in [y_i^-, y_i^+], i = 1, \dots, N. \quad (3.3)$$

Інтервальна система (3.2) є складною у зв'язку з нелінійністю отриманих рівнянь, для розв'язку яких доцільно побудувати таку цільову функцію:

$$F(\hat{b}_k) \xrightarrow{\hat{b}} \min, \hat{b} \in \Psi, \quad (3.4)$$

де  $\hat{b}$  – вектор оцінок параметрів статичної системи;  $\Psi$  – область параметрів статичної системи, яка визначається фізичним змістом параметрів;  $F(\hat{b}_k)$  – значення функції мети оцінювання вектора параметрів системи. При цьому

процедуру оцінювання вектора параметрів статичної системи необхідно організувати в такий спосіб, щоб забезпечити зменшення значень функції мети  $F(\hat{b}_1) > F(\hat{b}_2) > \dots > F(\hat{b}_k) > \dots > F(\hat{b}_{k=K} = \hat{b} \in \Omega)$  за скінчену та якомога меншу кількість ітерацій  $k = K$ .

Функцію мети оцінювання вектора параметрів системи  $F(\hat{b}_k)$  визначатимемо як різницю між значеннями вихідних характеристик системи, знайдених у процесі розв'язку ІСНАР (3.2) та центрів заданих інтервалів обмежень на вихідні характеристики (3.1). Формально цю умову запишемо у такому вигляді:

$$F(\hat{b}) = \min_{i=1, \dots, N} \left\{ g_i(\hat{b}) - \text{mid}([y_i]) \right\}, \quad (3.5)$$

де  $g_i(\hat{b})$  – обчислене під час розв'язку інтервальної системи нелінійних алгебричних рівнянь (3.2) на поточній ітерації значення вихідних характеристик;  $[y_i] = [y_i^-, y_i^+]$ ;  $\text{mid}(\bullet)$  – операція визначення центру інтервалу.

Проведемо аналіз функції мети в залежності від досягнутої якості поточного наближення вектора параметрів статичної системи. На рисунку 3.1 наведено графічну ілюстрацію обчислення значення функції мети (3.5).

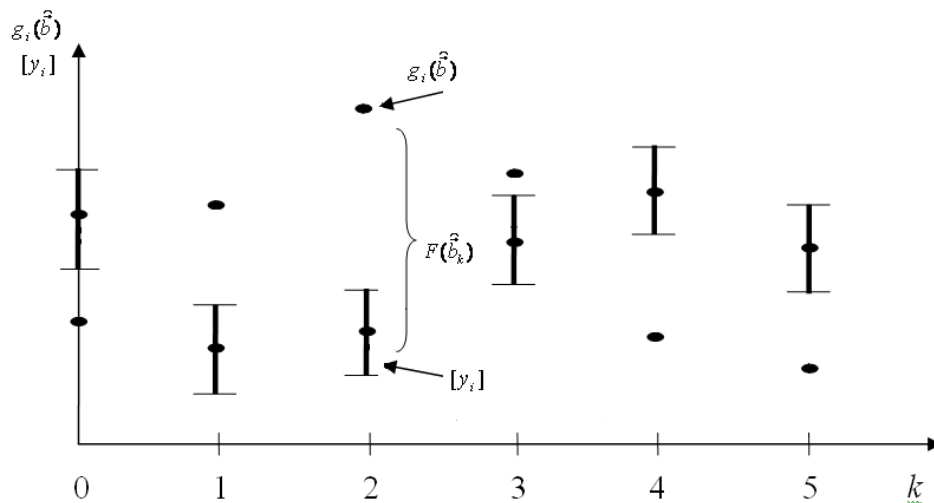


Рис. 3.1. Ілюстрація до обчислення функції мети за формулою (3.5)

Як бачимо з рисунку 3.1. найбільше відхилення між заданим інтервалом обмежень на вихідні характеристики  $[y_i]$  та точковим значенням вихідних характеристик, обчислених під час розв'язування ІСНАР  $g_i(\hat{b})$ , спостерігаємо на дискреті  $k = 2$ . Саме це відхилення на поточній ітерації визначає значення функції мети (3.5).

Особливістю постановки задачі забезпечення функціональної придатності статичної системи у формі (3.4-3.5), на відміну від існуючих, полягає у тому, що зазначена постановка задачі по-іншому інтерпретує оптимальні параметри системи тобто як такі, значення яких забезпечують функціональну придатність системи. Традиційні ж задачі, замість функції мети (3.5), яка мінімізується, використовують мінімізацію середньоквадратичного відхилення, що може не забезпечити функціональну придатність системи.

Очевидно, що чим більша кількість рівнянь в інтервальній системі (3.2), тим складніше знайти розв'язок ІСНАР. Зазначену задачу відносять до типу NP-повних задач. Одним із методів пошуку невідомого вектора параметрів статичної системи є методи випадкового пошуку (детальніше див. пункт 3.2). Основною особливістю зазначеного методу є те, що в процесі обрахунку наближення  $\hat{b}_i$  використовують випадкові вектори в якості напрямку руху.

Пошук кращого вектора параметрів продовжується до тих пір, доки зменшується значення функції мети. Якщо ж на певній ітерації виконання алгоритму випадкового пошуку серед згенерованих точок не можливо знайти точку, яка зменшує значення функції мети, тоді доцільно застосувати адаптивний алгоритм випадкового пошуку зі змінним кроком (радіусом пошуку).

Таким чином, для розв'язання задачі забезпечення функціональної придатності статичних систем обґрунтовано використання методів на основі аналізу інтервальних даних. Вказано, що для її розв'язання використовують методи оптимізації, зокрема процедури випадкового пошуку. Розроблено

метод забезпечення функціональної придатності статичних систем, який одночасно враховує обмеження на вихідні характеристики системи та забезпечує оцінювання її оптимальних параметрів. Проте, з точки зору практики, така постановка задачі є не зовсім коректною, оскільки розв'язок ІСНАР (3.2) у вигляді вектора параметрів  $\vec{b} = (b_1, \dots, b_m)^T$  при його практичній реалізації не забезпечить виконання умов функціональної придатності хоча б тому, що існують технологічні відхилення параметрів елементів статичної системи від номінальних значень при їх виготовленні.

### **3.2. Метод забезпечення функціональної придатності статичних систем на основі аналізу інтервальних даних з урахуванням одночасного знаходження оптимальних параметрів статичних систем та їх допусків**

Із врахуванням недоліків, зазначених вище, варто урахувати відхилення значень параметрів компонентів від номінальних значень. Тому перепишемо задачу (3.2) в іншому вигляді: задамо відносні відхилення параметрів статичної системи від номінальних та перейдемо в ІСНАР (3.2) до відносних відхилень характеристик системи від номінальних:

$$y_{0i} + y_{0i} \cdot \delta y_i^- \leq g_i[\vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta \vec{b}^-; \vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta \vec{b}^+] \leq y_{0i} + y_{0i} \cdot \delta y_i^+, i = 1, \dots, N, \quad (3.6)$$

де  $[\delta \vec{b}] = [\delta \vec{b}^-; \delta \vec{b}^+]$  – допуски на параметри системи;  $\delta \vec{b}^-, \delta \vec{b}^+$  – відносні відхилення параметрів компонентів статичної системи від номінальних;  $\vec{b}_0$  – невідомий вектор номінальних значень параметрів компонентів системи;  $y_{0i}, i = 1, \dots, N$  – номінальні значення вихідних характеристик статичної системи;  $\delta y_i^-, \delta y_i^+, i = 1, \dots, N$  – відносні відхилення характеристик від номінальних.

Якщо усі функції  $g_i(\vec{b})$  на проміжку  $[\vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta \vec{b}^-; \vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta \vec{b}^+]$  є

монотонними, то скористаємось правилами інтервальної арифметики та отримаємо таку ІСНАР:

$$y_{0i} \cdot \delta y_i^- \leq g_i[\vec{b}_0 \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_0 \cdot \vec{\delta b}^+] \leq y_{0i} \cdot \delta y_i^+, i = 1, \dots, N. \quad (3.7)$$

Умову узгодження заданих обмежень на вихідні характеристики статичної системи, представлених в інтервальному вигляді (3.1), із даними, отриманими на основі розв'язку ІСНАР (3.6), що означає забезпечення функціональної придатності, можемо сформулювати в такому вигляді:

$$g_i[\vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \vec{\delta b}^+] \subset [y_{0i}^-, y_{0i}^+], i = 1, \dots, N. \quad (3.8)$$

де  $[y_{0i}^-, y_{0i}^+]$  - інтервали обмежень на номінальні значення вихідної характеристики статичної системи.

Умова (3.8) забезпечує отримання  $i$ -ї вихідної характеристики статичної системи при заданих допусках на параметри системи в межах заданих  $i$ -х інтервалів обмежень на значення вихідної характеристики.

Система (3.7) є ІСНАР, для знаходження хоча б одного її розв'язку із множини необхідно перейти до оптимізаційної задачі:

$$F([\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^+]) \xrightarrow{\vec{b}_k, \vec{\delta b}_k} \min, \vec{b}_j > 0, \delta b_j > \delta b_j^z, \vec{b} \in \Psi, j = 1..m, \quad (3.9)$$

де  $\delta b_j^z$  - задані мінімально допустимі для певної схеми допуски на параметри елементів,  $F([\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^+])$  - значення функції мети, яка побудована на основі ІСНАР (3.6) і на кожній ітерації визначає досягнуту «якість» наближення оцінки вектора параметрів статичної системи до шуканих номінальних значень.

Функцію мети  $F(\vec{b}_k)$  «якості» наближення оцінки вектора параметрів

визначаємо як різницю центрів, найбільш віддалених між собою  $i$ -го інтервалу допустимих значень вихідної характеристики системи при заданих допусках на параметри системи та заданого початкового інтервалу значень вихідної характеристики для випадку, коли вказані інтервали не перетинаються. Формально цю умову запишемо у такому вигляді:

$$F(\vec{b}_k) = \min_{i=1, \dots, N} \left\{ \left| \text{mid}(g_i[\vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta\vec{b}^-; \vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta\vec{b}^+]) - \text{mid}([y_{0i}^-, y_{0i}^+]) \right| \right\}, \quad (3.10)$$

якщо  $g_i[\vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta\vec{b}^-; \vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta\vec{b}^+] \cap [y_{0i}^-, y_{0i}^+] = \emptyset \exists i = 1, \dots, N$ .

Для випадку, коли  $i$ -й інтервал допустимих значень вихідної характеристики статичної системи при заданих допусках на параметри системи та заданий інтервал значень вихідної характеристики перетинаються, функцію мети  $F(\vec{b}_k)$  «якості» наближення оцінки вектора параметрів визначаємо як найменшу ширину перетину вказаних інтервалів. Формально цю умову запишемо у такому вигляді:

$$F(\vec{b}_k) = \min_{i=1, \dots, N} \{ | \text{wid}(g_i[\vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta\vec{b}^-; \vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta\vec{b}^+]) - \text{wid}(g_i[\vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta\vec{b}^-; \vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta\vec{b}^+] \cap [y_{0i}^-, y_{0i}^+]) | \}, \quad (3.11)$$

якщо  $g_i[\vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta\vec{b}^-; \vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta\vec{b}^+] \cap [y_{0i}^-, y_{0i}^+] \neq \emptyset \forall i = 1, \dots, N$ .

Проведемо аналіз функції мети в залежності від досягнутої якості поточного наближення параметрів статичної системи. Для цього скористаємося рисунком 3.2. На рисунку 3.2 наведено графічну ілюстрацію для обох випадків (вирази (3.10) та (3.11)) обчислення функції мети. Як бачимо з рис.3.2(а), у першому випадку (обчислення за виразом (3.10)) інтервальні оцінки значень  $i$ -ї вихідної характеристики системи при заданих допусках на параметри системи та значень характеристики заданої для дискретних значень  $k$  суттєво відрізняються одна від одної. Найбільше відхилення бачимо між центрами інтервалів  $g_i[\vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta\vec{b}^-; \vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta\vec{b}^+]$  та

$[y_{0i}^-; y_{0i}^+]$  для дискрети  $k = 2$ . Модуль цього відхилення і є значенням функції мети. Можна припустити, що у цьому випадку інтервальні оцінки модельованої характеристики отримані за наявності достатньо «жорстких», тобто не точних оцінок параметрів статичної системи.

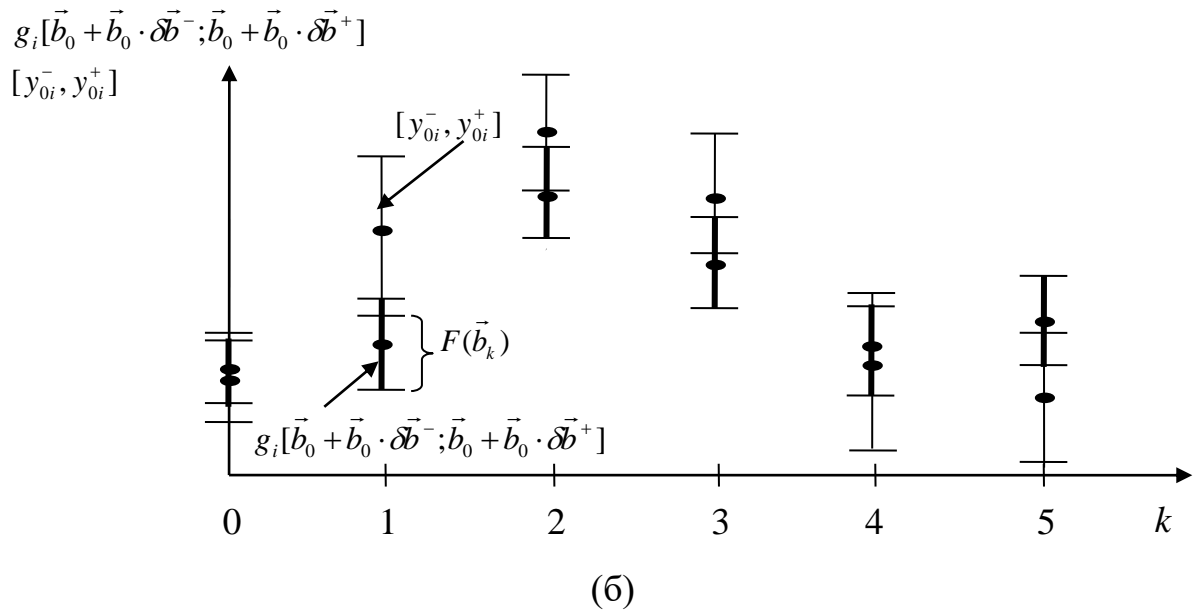
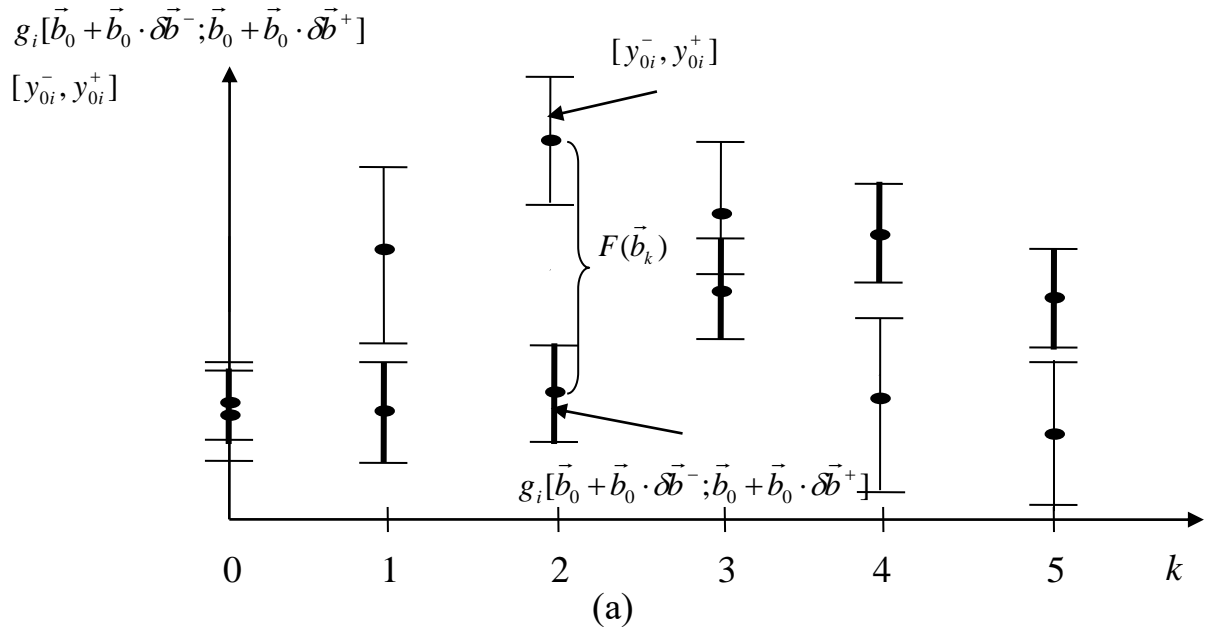


Рис. 3.2. Ілюстрація до обчислення функції мети:

- а) за формулою (3.10) для випадку неточного наближення оцінок параметрів системи;
- б) за формулою (3.11) для випадку уточнення оцінок параметрів системи.

Як тільки оцінки параметрів системи в процесі обрахунку уточнюються, то перетини інтервальних оцінок прогнозної характеристики та інтервальних



оцінок характеристики заданої для кожної дискрети стають не порожніми множинами, як це показано на рисунку 3.2(б). Тоді функцію мети обчислюємо за виразом (3.11). Як бачимо з рисунку 3.2(б) найбільше відхилення спостерігається між інтервалами  $g_i[\vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta\vec{b}^-; \vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta\vec{b}^+]$  та  $[y_{0i}^-; y_{0i}^+]$  для дискрети  $k = 1$ . Саме це відхилення, обчислене за виразом (3.11), визначає значення функції мети на поточній ітерації випадкового пошуку.

Як вже зазначалось вище, пошук невідомого вектора параметрів у задачі забезпечення функціональної придатності доцільно здійснювати методами випадкового пошуку. Метод випадкового пошуку розглядався в багатьох працях, зокрема Стахіва П.Г., Співак І.Я., Дивака Т.М. тощо. Проте в нашому випадку задача суттєво ускладнюється через те, що при обчисленні інтервалів значень  $g_i[\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta\vec{b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta\vec{b}^+]$  вихідних характеристик статичної системи використовуємо не лише оцінки  $\vec{b}_k$  вектора номінальних значень параметрів  $\vec{b}_0$  (як це відбувається в класичних обчислювальних схемах), а певні інтервальні оцінки  $[\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta\vec{b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \delta\vec{b}^+]$  цього вектора, обумовлені заданими допусками на параметри компонентів системи.

Виходячи з вищевикладеного, для розв'язування задачі забезпечення функціональної придатності статичної системи у вигляді задачі оптимізації (3.5) запропоновано розглянути та дослідити процедури випадкового пошуку, які описано у праці Растрігіна Л.А.: випадковий пошук із лінійною тактикою; випадковий пошук за найкращою спробою; випадковий пошук із використанням направляючого конуса; випадковий пошук із адаптацією розподілу випадкового кроку.

В основі обчислювальних схем, розглянутих у праці Растрігіна Л.А., є правила урахування історії пошуку у послідовності  $\vec{b}_1 \rightarrow \vec{b}_2 \rightarrow \dots \rightarrow \vec{b}_i \rightarrow \dots \rightarrow \vec{b}_k$ .

**Процедура випадкового пошуку з лінійною тактикою (ВПЗЛП).** Випадковий пошук такого роду побудований за допомогою двох операторів: генерування випадкового вектора параметрів та

їх допусків  $\vec{B} = (\vec{b}_k, \vec{\delta b}_k)$  або повторення кроку за аналогією з попередньою ітерацією. Дія кожного із них може привести до одного з двох результатів: значення функції  $F([\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^+])$  або зменшиться, або залишиться без змін. Процедура випадкового пошуку з лінійною тактикою базується на наступному очевидному припущенні стосовно об'єкта оптимізації: імовірність вдалого кроку у напрямку, який був успішним на попередній ітерації, тобто коли функція мети зменшувалася, буде більшою, ніж імовірність вдалого кроку, вибраного випадковим чином. При пошуку параметрів елементів статичної системи це означатиме доцільність повтору успішного кроку, а у випадку невдачі слід обирати напрям пошуку випадковим чином. Лінійність тактики вказаної процедури полягає в імітації лінійної поведінки, тобто в прямому повторенні вдалого кроку.

Формально правило обчислення поточного значення параметрів системи в цій процедурі випадкового пошуку запишемо у такому вигляді:

$$\vec{B}_k = \vec{B}_{k-1} + \Delta \vec{B}_k, \quad (3.12)$$

де

$$\Delta \vec{B}_k = \begin{cases} r \cdot \vec{\xi}, & \text{якщо } F([\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^+]) - F([\vec{b}_{k-1} + \vec{b}_{k-1} \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_{k-1} + \vec{b}_{k-1} \cdot \vec{\delta b}^+]) \geq 0 \\ \Delta \vec{B}_{k-1}, & \text{якщо } F([\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^+]) - F([\vec{b}_{k-1} + \vec{b}_{k-1} \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_{k-1} + \vec{b}_{k-1} \cdot \vec{\delta b}^+]) < 0 \end{cases}, \quad (3.13)$$

де  $r$  – поточний радіус;

$\vec{\xi}$  – одиничний випадковий вектор, рівномірно розподілений за усіма напрямками простору параметрів, що оптимізуються, та їх допусків;

$\Delta \vec{B}_k, \Delta \vec{B}_{k-1}$  – величина кроку на  $k$ -тій та на  $k-1$  ітераціях.

Зазначена схема має достатньо просту геометричну інтерпретацію. Фактично це спуск із довжиною кроку  $r$  або у випадковому напрямку  $\vec{\xi}$  у просторі оцінок вектора параметрів та їх допусків  $\vec{B} = (\vec{b}_k, \vec{\delta b}_k)$  або із послідовним застосуванням оператора повторення по поверхні, яка задана функцією  $F([\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^+])$  у напрямку, такому ж, як на попередніх

кроках, до тих пір, поки значення функції  $F([\vec{b} + \vec{b} \cdot \delta\vec{b}^-; \vec{b} + \vec{b} \cdot \delta\vec{b}^+])$  не почне зростати. Це є сигналом того, що обраний напрям більше не перспективний і потрібно обирати новий, - випадковий.

Блок-схема процедури випадкового пошуку з лінійною тактикою наведена на рисунку 3.3.

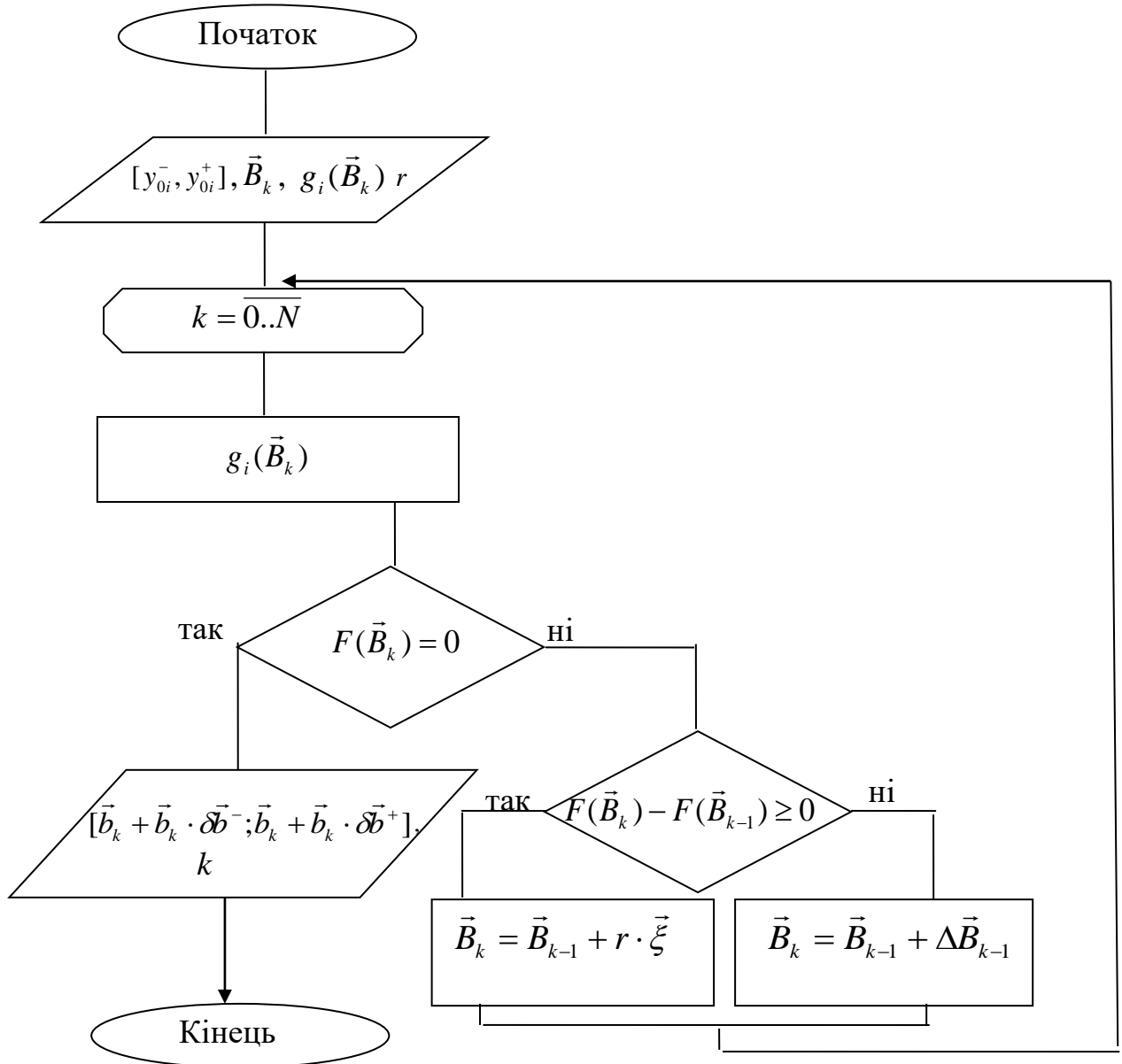


Рис. 3.3. Блок-схема процедури випадкового пошуку із лінійною тактикою

Тепер розглянемо специфіку і можливості описаної обчислювальної схеми. Нехай  $p$  – імовірність того, що величина випадкового кроку  $\Delta\vec{B}_k = r \cdot \vec{\xi}$  успішна, а  $q$  – імовірність повторення попереднього успішного

кроку. Описана обчислювальна схема буде ефективною, коли часто «спрацьовує» оператор повторення кроку, оскільки в ці моменти гарантовано зменшується значення функції мети. Звідси випливає, що для ефективної роботи даного алгоритму необхідно, щоб ймовірність  $q$  була більшою ніж  $p$ . Виходячи з на властивостей функції мети  $F([\vec{b} + \vec{b} \cdot \vec{\delta}^-; \vec{b} + \vec{b} \cdot \vec{\delta}^+])$ , можемо припустити, що ефективність розглянутої лінійної стратегії в процедурі випадкового пошуку буде висока для початкових ітерацій, коли оцінки параметрів є «грубими» і функція мети на цій ділянці є монотонно спадною.

**Процедура випадкового пошуку за найкращою спробою (ВПпНС).** Випадковий пошук такого роду побудований на обчисленні значень функції мети в  $L$  точках, згенерованих випадковим чином на деякій локальній області пошуку. Набір цих точок представимо таким виразом:

$$\vec{B}_l = \vec{B}_{k-1} + r \cdot \vec{\xi}_l, l = 1, \dots, L \quad (3.14)$$

де  $\vec{B}_l$  – одна точка із набору, що претендує на «покращену» оцінку вектора  $\vec{B}_k$  параметрів фільтра на  $k$ -тій ітерації;

$\vec{\xi}_l$  – одиничний випадковий вектор, рівномірно розподілений за усіма напрямками простору параметрів, які оптимізуються, та їх допусків.

Вибір напрямку  $\vec{\xi}^*$  найкращої спроби визначаємо наступним чином:

$$F([\vec{b}_{k-1} + \vec{b}_{k-1} \cdot \vec{\delta}^-; \vec{b}_{k-1} + \vec{b}_{k-1} \cdot \vec{\delta}^+] + r \cdot \vec{\xi}^*) = \min_{l=1, \dots, L} (F([\vec{b}_{k-1} + \vec{b}_{k-1} \cdot \vec{\delta}^-; \vec{b}_{k-1} + \vec{b}_{k-1} \cdot \vec{\delta}^+] + r \cdot \vec{\xi}_l)) \quad (3.15)$$

Основна складність у застосуванні розглянутої обчислювальної схеми полягає у виборі числа  $L$ . Чим більше значення  $L$ , тим вищою буде обчислювальна складність реалізації методу з цією процедурою, оскільки збільшується кількість поточних оцінок параметрів фільтра, для яких необхідно обчислювати значення функції мети за формулами (3.10) чи (3.11). У той же час зменшення значення  $L$  може призвести до збільшення кількості

ітерацій обчислювального методу і тим самим підвищити його часову складність.

Блок-схема процедури випадкового пошуку за найкращою спробою наведена на рисунку 3.4.

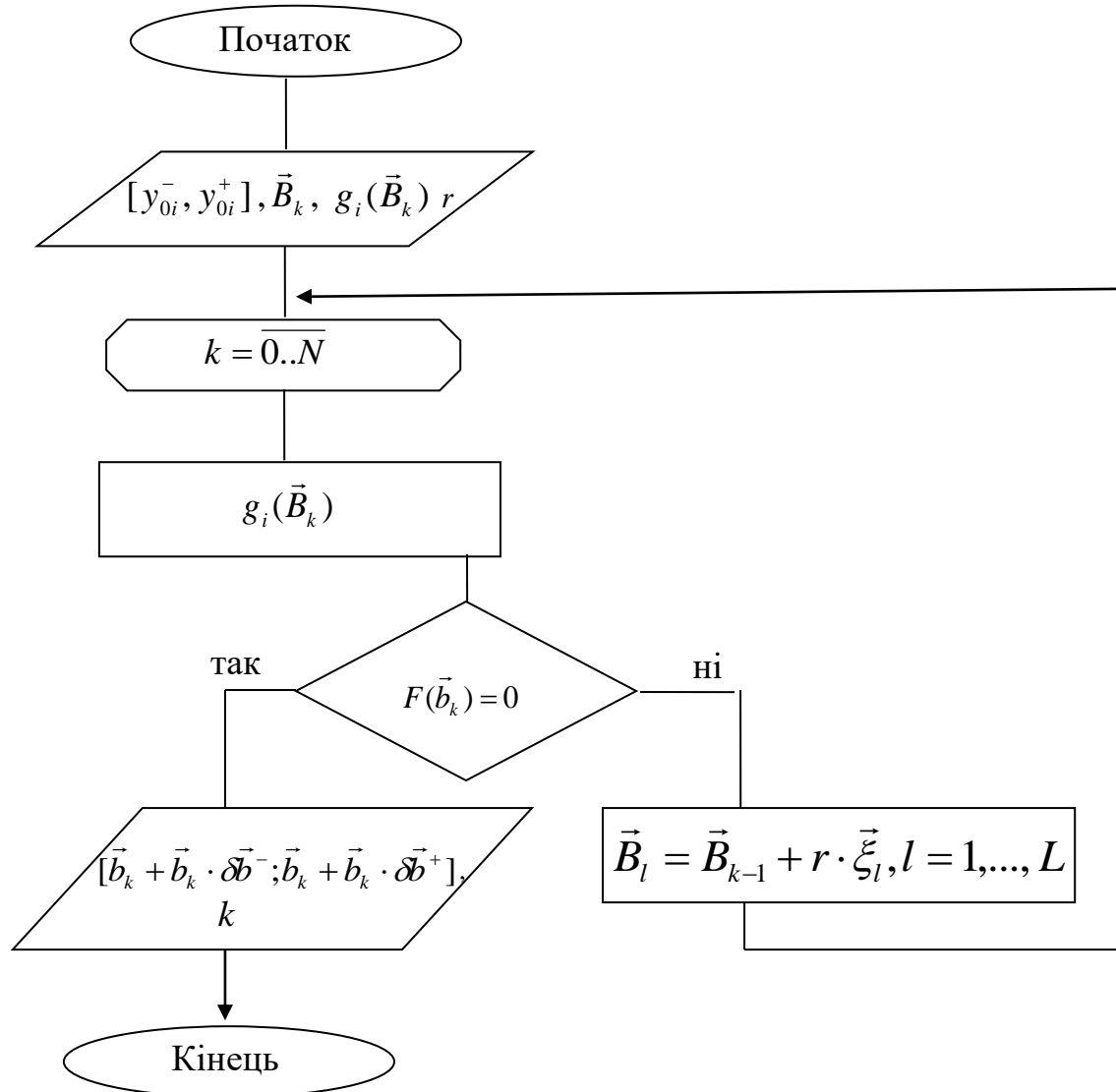


Рис. 3.4. Блок-схема процедури випадкового пошуку за найкращою спробою

**Процедура випадкового пошуку з використанням направляючого конуса (ВПізВНК).** Розглянемо обчислювальну схему у процедурі випадкового пошуку мінімуму функції мети  $F([\vec{b} + \vec{b} \cdot \vec{\delta}^-; \vec{b} + \vec{b} \cdot \vec{\delta}^+])$  з використанням направляючого конуса.

На початковій ітерації випадкового пошуку ( $k=0$ ) задаємо початкове наближення вектора параметрів  $\vec{B}_0$ . В околі цього наближення на поверхні

уявної гіперсфери радіусом  $r$ , тобто на відстані  $r$  від точки  $\vec{B}_0$  в просторі параметрів на основі рівномірного закону розподілу генеруємо  $n$  випадкових точок:

$$\vec{B}_n = \vec{B}_0 + r \cdot \vec{\xi}_n, n = 1, \dots, N. \quad (3.16)$$

Серед згенерованих вибираємо точку, яка забезпечує найменше значення функції мети:

$$\vec{B}_1 = \arg \min_{n=1, \dots, N} (F([\vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \vec{\delta b}^+] + r \cdot \vec{\xi})). \quad (3.17)$$

Отримана оцінка вектора параметрів статичної системи є наближенням для наступної ітерації. Додатково в цій процедурі обчислюємо інтервальний вектор пам'яті, який визначає успішний напрям пошуку:

$$\vec{w} = \text{mid}[(\vec{B}_1 - \vec{B}_0) / r], \quad (3.18)$$

де  $\text{mid}(\bullet)$  – операція визначення середини інтервалу подальшого пошуку.

На наступних ітераціях у просторі параметрів будуємо уявні гіперконуси з вершинами в точках  $\vec{B} = (\vec{b}_k, \vec{\delta b}_k)$ , які є поточними оцінками вектора параметрів з кутом розкриття  $\psi$  і віссю  $\vec{w}_k$ . Ці гіперконуси «відсікають» від гіперсфер з центрами у точках  $\vec{B} = (\vec{b}_k, \vec{\delta b}_k)$  і радіусом  $r$  деякі поверхні. На отриманих поверхнях у просторі параметрів та їх допусків генеруємо на основі рівномірного закону розподілу  $n$  випадкових точок за формулою (3.16), де вектор  $\vec{\xi}_n$  в даному випадку обчислюємо, виходячи із обмежень на параметри конуса. Серед згенерованих точок вибираємо точку, яка забезпечує найменше значення функції мети:

$$\vec{B}_{k+1} = \arg \min_{n=1, \dots, N} (F([\vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^-; \vec{b}_k + \vec{b}_k \cdot \vec{\delta b}^+] + r \cdot \vec{\xi}_n)). \quad (3.19)$$

Отримана оцінка вектора параметрів є наближенням для наступної  $k+1$  ітерації пошукової процедури.. Додатково у цій процедурі перевизначаємо вектор пам'яті:

$$\vec{w}_{k+1} = \text{mid}[\alpha \cdot \vec{w}_k + \beta \cdot \frac{\vec{B}_{k+1} - \vec{B}_k}{r}], \quad (3.20)$$

де  $\alpha$  – ( $0 \leq \alpha \leq 1$ )– коефіцієнт забування, а  $\beta$  – коефіцієнт інтенсивності врахування нової інформації.

Блок-схема процедури випадкового пошуку із використанням направляючого конуса подана на рисунку 3.5.

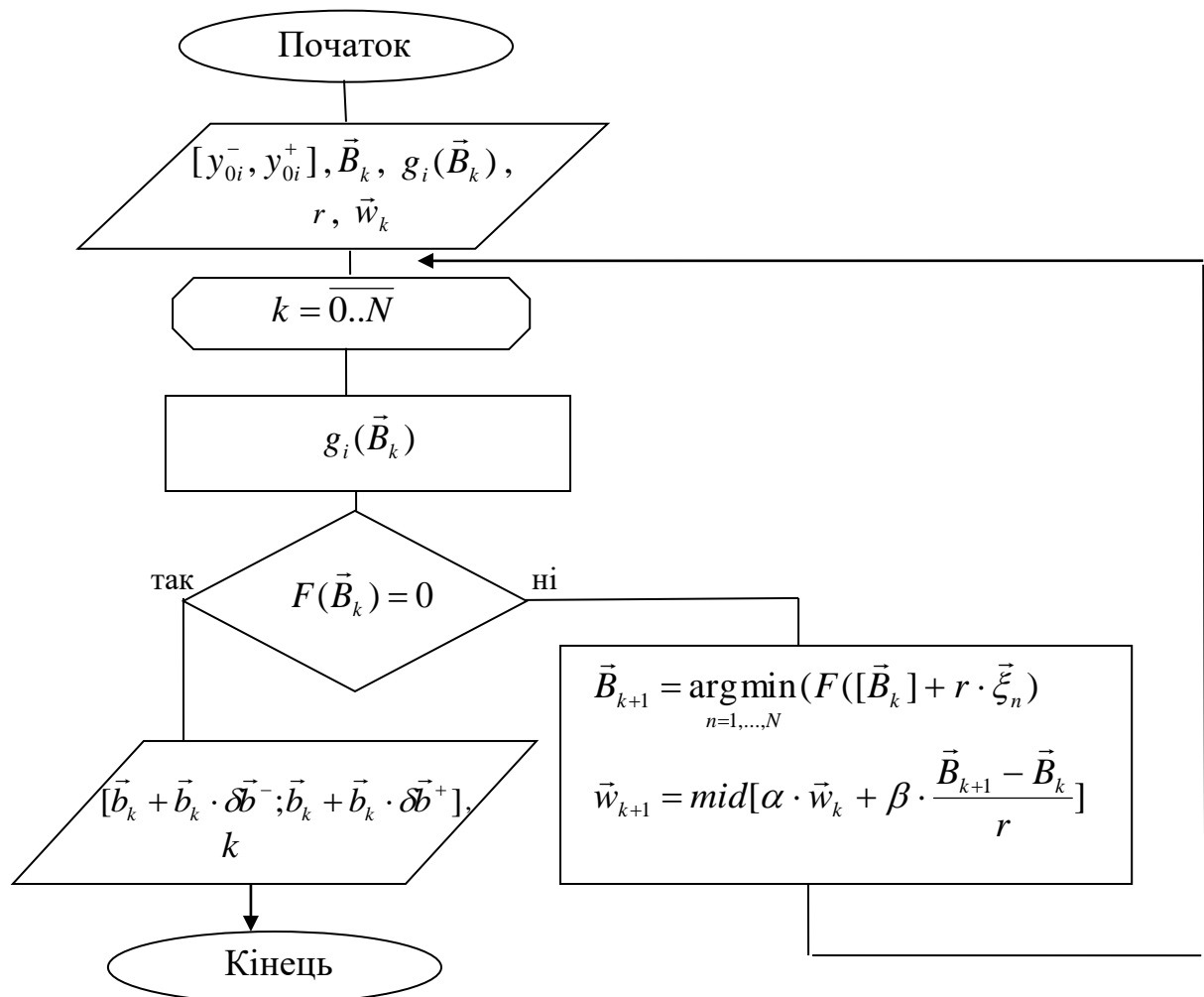


Рис. 3.5. Блок-схема процедури випадкового пошуку із використанням направляючого конуса

Пошук продовжується, доки зменшується значення функції мети. Якщо ж значення функції мети не зменшується на певній ітерації, то замість конуса використовуємо гіперсферу, як на початковій ітерації для заданого вектора оцінок параметрів. Якщо ж і далі серед згенерованих точок неможливо знайти точку, яка забезпечує зменшення функції мети, то у цьому випадку налаштуємо довжину кроку  $r$  і, як правило, зменшуємо її.

**Процедура випадкового пошуку з адаптацією розподілу випадкового кроку (ВПізАРВК).** Основною характеристикою цього розподілу є математичне сподівання  $M(\vec{\xi})$ . Суть випадкового пошуку із адаптацією розподілу випадкового кроку полягає в зміні  $M(\vec{\xi})$  таким чином, щоб якомога більше враховувати «історію» пошуку, тобто «успішні» кроки. Отже, математичне сподівання випадкового напрямку  $\vec{\xi}$  змінюватимемо з урахуванням вектора пам'яті  $\vec{w}_{k+1}$ . Тоді вектор, що задає випадковий напрямок у задачі пошуку, матиме такий вигляд:

$$\vec{\xi}_{k+1} = \vec{\xi}_0 + \vec{w}_{k+1}, \quad (3.21)$$

де  $\vec{\xi}_0$  - деякий «нульовий вектор», що задається математичним сподіванням початкового розподілу.

Блок-схема процедури випадкового пошуку із адаптацією розподілу випадкового кроку представлено на рисунку 3.6.

Вектор пам'яті  $\vec{w}_{k+1}$  визначає зміщення «випадкового руху» у процесі пошуку. Передбачається, що це зміщення має бути направлене в сторону, де функція мети набуває нульового значення. У цьому випадку вектор пам'яті відображає історію пошуку і корегує перспективний напрям руху до мети. При цьому напрямок  $\vec{w}_{k+1}$  на кожній ітерації корегується.

Очевидно, що у такому підході закладено певну евристику: напрям потрібно формувати як зважену суму випадкових кроків, причому «успішні»



кроки потрібно брати з позитивними вагами, а «неуспішні» – з від’ємними. При цьому перевага повинна надаватися даним із «короткою історією».

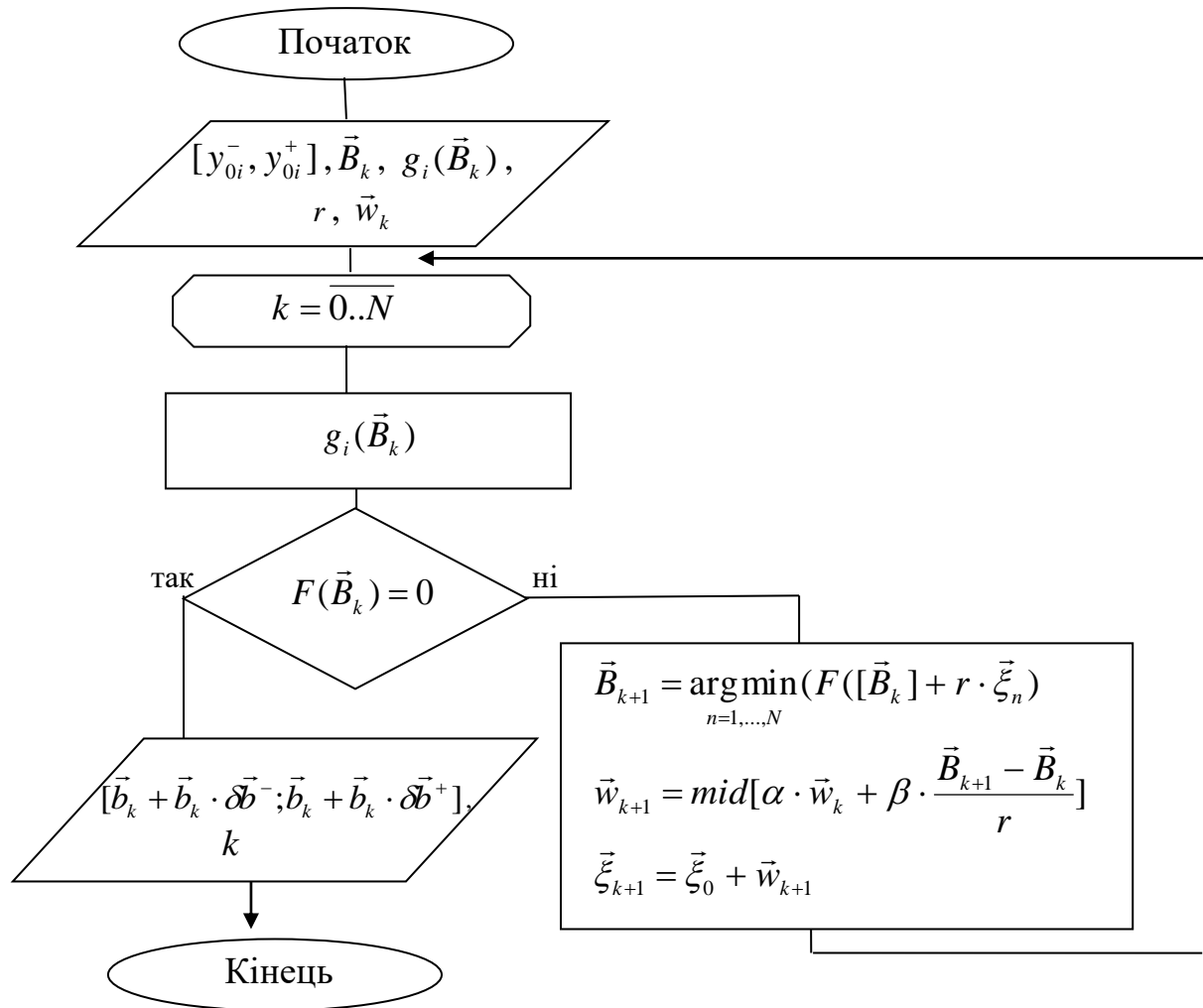


Рис. 3.6. Блок-схема процедури випадкового пошуку із адаптацією розподілу випадкового кроку

Таким чином, поставлено задачу забезпечення функціональної придатності статичних систем із врахуванням не лише обмежень на вихідні характеристики системи, але й допусків на її параметри, які виникають у процесі виготовлення та експлуатації системи. Розроблено метод забезпечення функціональної придатності статичних систем на основі аналізу інтервальних даних, який надає можливість одночасного знаходження оптимальних параметрів статичних систем та їх допусків. Згідно з методом, який базується на процедурі випадкового пошуку, удосконалено вище

розглянуті процедури випадкового пошуку для порівняння їх обчислювальної складності з вказаним типом задач.

### 3.3. Часова складність методу забезпечення функціональної придатності статичних систем з урахуванням одночасного знаходження оптимальних параметрів статичних систем та їх допусків з використанням різних процедур випадкового пошуку

Розглянемо обчислювальну складність вище описаних процедур випадкового пошуку для реалізації методу забезпечення функціональної придатності статичних систем з урахуванням одночасного знаходження оптимальних параметрів статичних систем та їх допусків на прикладі задачі оцінювання функціональної придатності смугового фільтра (див. рис. 3.7.).

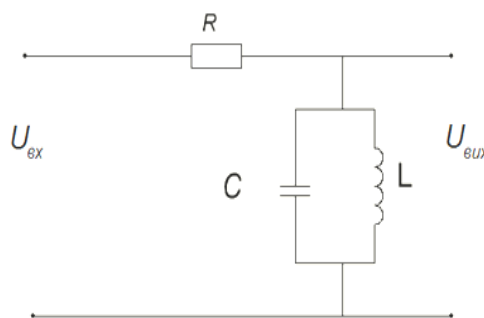


Рис.3.7. Схема смугового фільтра

Вираз для обчислення модуля коефіцієнта передачі смугового фільтра на рисунку 3.7 представлений формулою:

$$|K(f)| = \frac{1}{\sqrt{R_0^2 \cdot \left(\frac{1}{2\pi \cdot f \cdot L_0} - 2\pi \cdot f \cdot C_0\right)^2 + 1}}, \quad (3.22)$$

де  $f$  – частота;  $R_0, C_0, L_0$  – невідомі номінальні значення параметрів елементів фільтра, відповідно резистора, конденсатора та котушки

індуктивності.

За вихідні характеристики фільтра, які необхідно забезпечити в процесі забезпечення функціональної придатності, візьмемо модуль коефіцієнта передачі на різних частотах. Задамо необхідні номінальні значення модуля коефіцієнта передачі  $|K(f_i)| = K_{0i}, i = 1, \dots, N$  на різних частотах і допустимі відхилення від цих значень у межах 20%, тобто  $\delta K_i = 0,2$ . Тоді вважатимемо, що зазначене коло є функціонально-придатним.

Допустимі значення для цієї характеристики на різних частотах представлено у таблиці 3.1 та на рисунку 3.8.

Таблиця 3.1

## Обмеження на вихідні характеристики РЕК на різних частотах

$i$	$f_i$	$K_{0i}$	$K_i^- = K_{0i} - K_{0i} \cdot \delta K_i$	$K_i^+ = K_{0i} + K_{0i} \cdot \delta K_i$
1	70700	0,295810306	0,236648245	0,354972
2	70750	0,324681261	0,259745009	0,389618
3	70800	0,359323772	0,287459018	0,431189
4	70850	0,401452582	0,321162066	0,481743
5	70900	0,453384085	0,362707268	0,544061
6	70950	0,518154327	0,414523461	0,621785
7	71000	0,599350631	0,479480504	0,719221
8	71050	0,699805336	0,559844269	0,839766
9	71100	0,816863688	0,65349095	0,980236
10	71150	0,931096493	0,744877195	1,117316
11	71200	0,997002478	0,797601983	1,196403
12	71250	0,973189315	0,778551452	1,167827
13	71300	0,87619141	0,700953128	1,05143
14	71350	0,756847583	0,605478066	0,908217
15	71400	0,647525248	0,518020198	0,77703
16	71450	0,557289514	0,445831611	0,668747
17	71500	0,48507222	0,388057776	0,582087
18	71550	0,427376843	0,341901475	0,512852
19	71600	0,380851292	0,304681033	0,457022
20	71650	0,342842745	0,274274196	0,411411
21	71700	0,311367179	0,249093743	0,373641

Задамо мінімально допустимі допуски на усі параметри елементів РЕК в розмірі 2%, тобто  $\delta b_j^- = -0,02$ , а  $\delta b_j^+ = 0,02$  та представимо вектор параметрів елементів РЕК в інтервальному вигляді:

$$\begin{aligned} [\vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta \vec{b}^-; \vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta \vec{b}^+] &= ([R_0 + R_0 \cdot \delta R^-; R_0 + R_0 \cdot \delta R^+], \\ [C_0 + C_0 \cdot \delta C^-; C_0 + C_0 \cdot \delta C^+], [L_0 + L_0 \cdot \delta L^-; L_0 + L_0 \cdot \delta L^+]) \end{aligned} \quad (3.23)$$

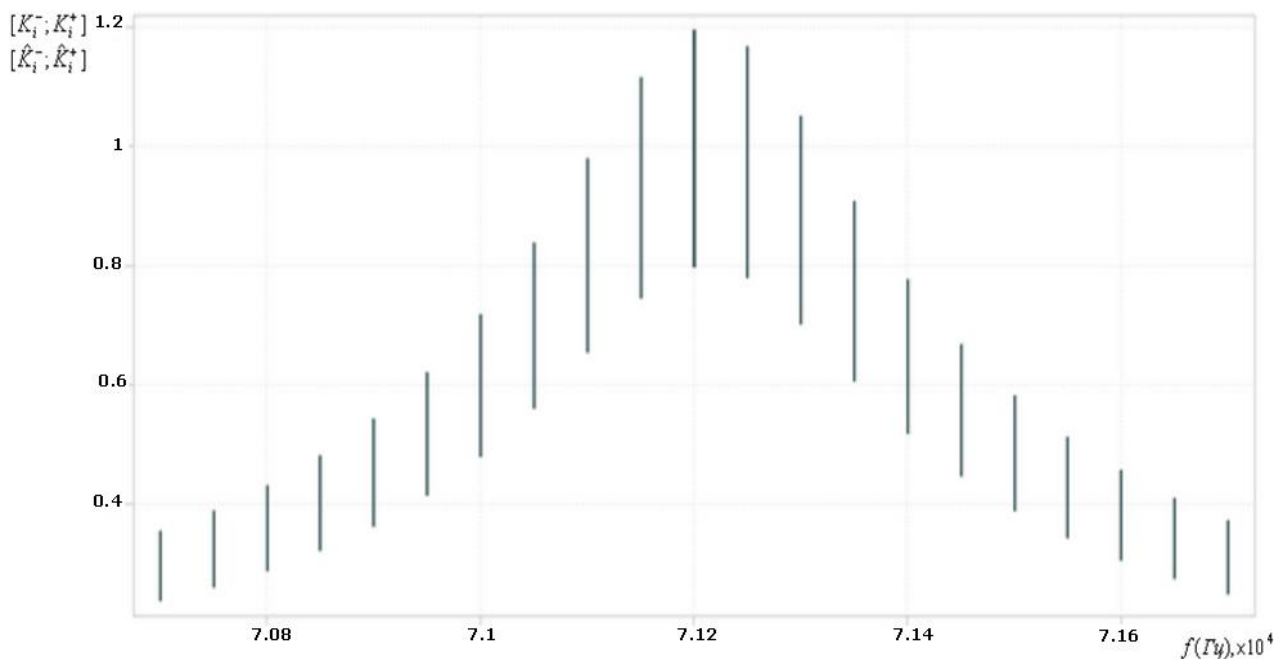


Рис. 3.8. Допустимі значення для модуля коефіцієнта передачі смугового фільтра

Зауважимо, що номінальні значення параметрів  $R_0, C_0, L_0$  елементів фільтра є не відомими, тобто не відомим є вектор  $\vec{b}_0$ . Підставимо в ІСНАР (3.7) замість  $g_i[\vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta \vec{b}^-; \vec{b}_0 + \vec{b}_0 \cdot \delta \vec{b}^+]$  функцію для модуля коефіцієнта передачі на різних частотах із заміною номінальних значень параметрів  $R_0, C_0, L_0$  на відповідні інтервали  $[R_0 + R_0 \cdot \delta R^-; R_0 + R_0 \cdot \delta R^+]$ ,  $[C_0 + C_0 \cdot \delta C^-; C_0 + C_0 \cdot \delta C^+]$ ,  $[L_0 + L_0 \cdot \delta L^-; L_0 + L_0 \cdot \delta L^+]$ , а замість інтервалів  $[y_{0i}^-; y_{0i}^+]$  підставимо  $[K_{0i}^-; K_{0i}^+]$ , отримаємо таку ІСНАР:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 K_{01}^- \leq \frac{1}{\sqrt{[0,98R_0;1,02R_0]^2 \cdot \left(\frac{1}{2\pi \cdot f_1 \cdot [0,98L_0;1,02L_0]} - 2\pi \cdot f_1 \cdot [0,98C_0;1,02C_0]\right)^2 + 1}} \leq K_{01}^+ \\
 \dots \\
 K_{0i}^- \leq \frac{1}{\sqrt{[0,98R_0;1,02R_0]^2 \cdot \left(\frac{1}{2\pi \cdot f_i \cdot [0,98L_0;1,02L_0]} - 2\pi \cdot f_i \cdot [0,98C_0;1,02C_0]\right)^2 + 1}} \leq K_{0i}^+ \\
 \dots \\
 K_{0N}^- \leq \frac{1}{\sqrt{[0,98R_0;1,02R_0]^2 \cdot \left(\frac{1}{2\pi \cdot f_n \cdot [0,98L_0;1,02L_0]} - 2\pi \cdot f_n \cdot [0,98C_0;1,02C_0]\right)^2 + 1}} \leq K_{0N}^+
 \end{array} \right. \quad (3.24)$$

Розв'яжемо отриману систему із застосуванням удосконалених процедур випадкового пошуку. Для цього розроблено програму пошуку невідомого вектора параметрів компонентів фільтра на основі чотирьох процедур випадкового пошуку: із лінійною тактикою, за найкращою спробою, із використанням направляючого конуса та із адаптацією розподілу випадкового кроку. Для реалізації вищезазначених методів використовувався ПК у такій комплектації: тип процесора - Mobile DualCore Intel Core i5-2410M, 2655 MHz (27 x 98); системна пам'ять - 8106 MB (DDR3-1333 DDR3 SDRAM). Форма введення початкових даних для усіх процедур наведена на рисунку 3.9.

Початкові дані:	<input type="text" value="1200"/>	<input type="text" value="0.0"/>	<input type="text" value="0.0001"/>
Радіус:	<input type="text" value="0.15"/>		
Кількість випадково згенер. чисел:	<input type="text" value="100"/>		
Кількість ітерацій:	<input type="text" value="1000000"/>		

Рис. 3.9. Форма введення початкових даних для процедур випадкового пошуку

Кількість випадковим чином згенерованих згідно з рівномірним законом розподілу точок в просторі параметрів на відстані радіуса від початково

заданого вектора параметрів дорівнює 100. Загальна кількість ітерацій 1.000.000, яку можна збільшити, якщо «якість» оцінювання не буде досягнуто.

Рисунок 3.10 ілюструє повідомлення про успішний пошук параметрів компонентів фільтра процедурою випадкового пошуку із лінійною тактикою. Інтервали значень для отриманих параметрів:  $[R^-; R^+] = [945,25; 1044,75] \text{ Ом}$ ,  $[C^-; C^+] = [0,46; 0,5] \text{ мкФ}$ ,  $[L^-; L^+] = [8,5; 9,5] \text{ мкГн}$ . Для їх пошуку обчислювальною процедурою було реалізовано 3.925.148 ітерацій, на які було витрачено близько 40 хвилин часу.

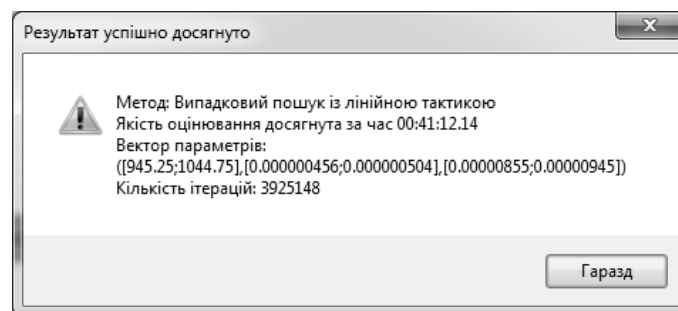


Рис. 3.10. Результат виконання процедури випадкового пошуку із лінійною тактикою

Рисунок 3.11 ілюструє повідомлення про успішний пошук параметрів компонентів фільтра процедурою випадкового пошуку за найкращою спробою. Інтервали значень для отриманих параметрів:  $[R^-; R^+] = [940,5; 1039,5] \text{ Ом}$ ,  $[C^-; C^+] = [0,48; 0,53] \text{ мкФ}$ ,  $[L^-; L^+] = [8,7; 9,7] \text{ мкГн}$ . Для їх пошуку обчислювальною процедурою було реалізовано 3.787.209 ітерацій, на які було витрачено близько 40 хвилин часу.

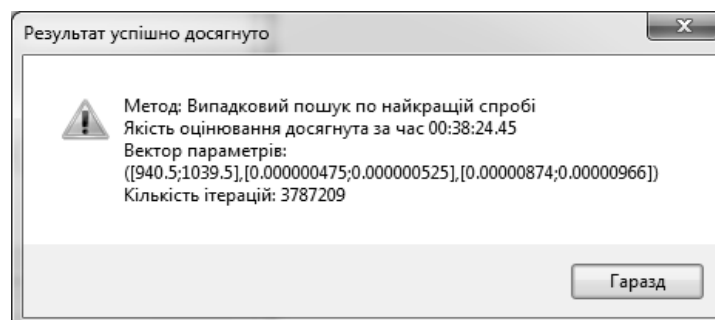


Рис. 3.11. Результат виконання процедури випадкового пошуку за найкращою спробою

Рисунок 3.12 ілюструє повідомлення про успішний пошук параметрів компонентів фільтра процедурою випадкового пошуку із використанням направляючого конуса. Інтервали значень для отриманих параметрів:  $[R^-; R^+] = [948,1; 1047,9] \text{ Ом}$ ,  $[C^-; C^+] = [0,48; 0,53] \text{ мкФ}$ ,  $[L^-; L^+] = [9,5; 10,5] \text{ мкГн}$ . Для їх пошуку обчислювальною процедурою було реалізовано 1.928.327 ітерацій, на які було витрачено близько 20 хвилин часу.

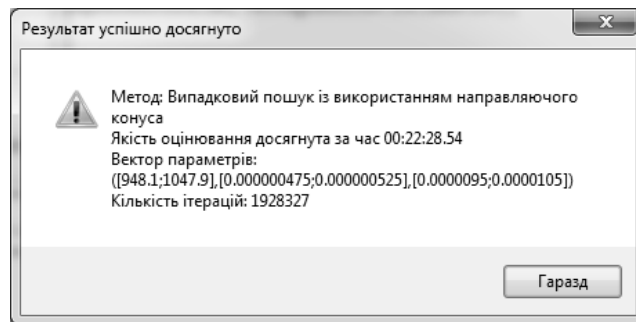


Рис. 3.12. Результат виконання процедури випадкового пошуку із використанням направляючого конуса

Рисунок 3.13 ілюструє повідомлення про успішний пошук параметрів елементів фільтра процедурою випадкового пошуку із адаптацією розподілу випадкового кроку. Інтервали значень для отриманих параметрів:  $[R^-; R^+] = [950,0; 1050,0] \text{ Ом}$ ,  $[C^-; C^+] = [0,38; 0,42] \text{ мкФ}$ ,  $[L^-; L^+] = [8,5; 9,5] \text{ мкГн}$ . Для їх пошуку обчислювальною процедурою було реалізовано 2.803.751 ітерацій, на які витрачено близько 30 хвилин часу.

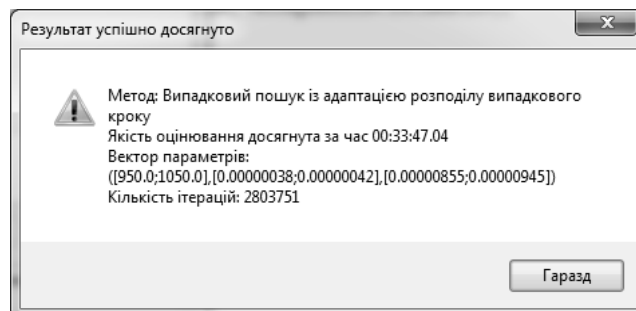


Рис. 3.13. Результат виконання процедури випадкового пошуку із адаптацією випадкового кроку

На рисунку 3.14 наведено характеристику модуля коефіцієнта передачі смугового фільтра з урахуванням початково заданих допусків на параметри

фільтра для кожної з вищеподаних процедур.

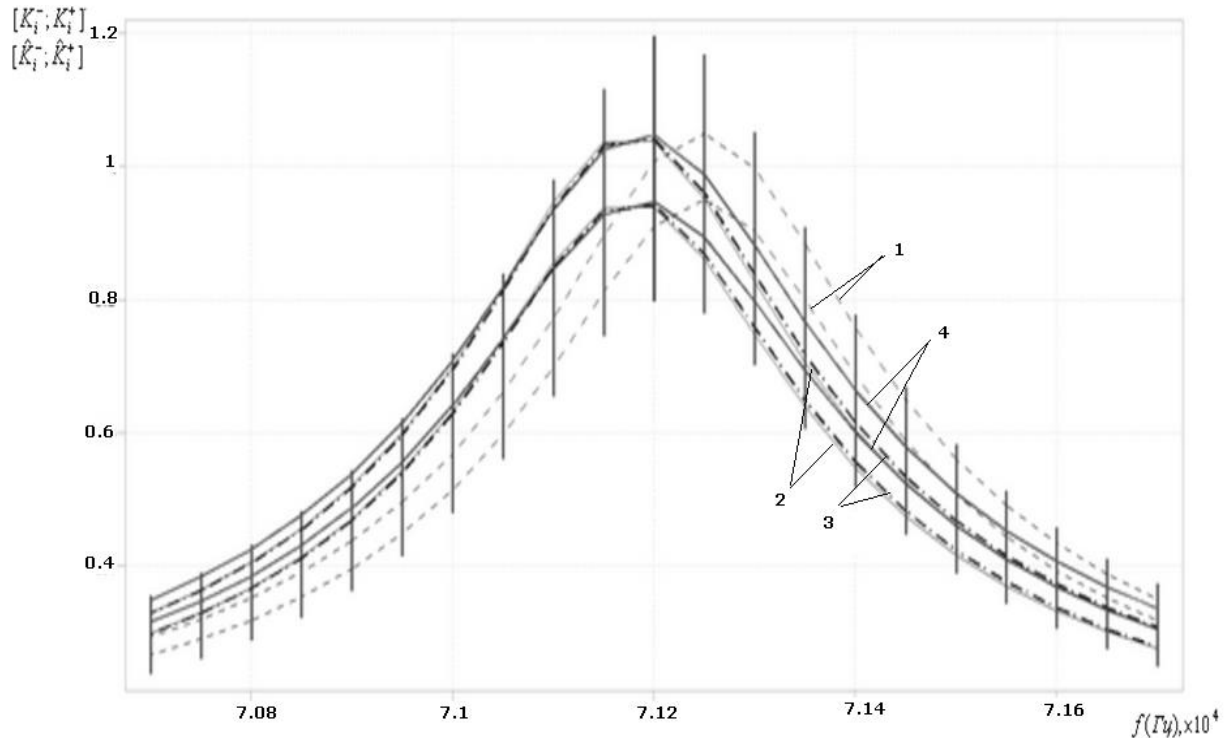


Рис. 3.14. Ілюстрація порівняння процедур випадкового пошуку:  
 1 – процедура випадкового пошуку із лінійною тактикою;  
 2 – процедура випадкового пошуку за найкращою спробою;  
 3 – процедура випадкового пошуку із використанням направляючого конуса;  
 4 – процедура випадкового пошуку із адаптацією розподілу випадкового кроку.

Пунктирною лінією наведений коридор, який містить допустимі значення характеристики модуля коефіцієнта передачі, розрахований процедурою випадкового пошуку з лінійною тактикою. Одинарною лінією наведено коридор, розрахований процедурою випадкового пошуку за найкращою спробою. Штрих-пунктирною лінією наведено коридор, розрахований процедурою випадкового пошуку з використанням направляючого конуса. Потовщеною лінією наведено коридор, розрахований процедурою випадкового пошуку із адаптацією розподілу випадкового кроку. Вертикальними відрізками наведені інтервали допустимих значень, які визначають функціональну придатність смугового фільтра. Як бачимо з рисунку 3.14, характеристика синтезованого смугового фільтра на заданих частотах знаходиться в допустимих межах.

На рисунку 3.15 у вигляді гістограми представлено порівняння



обчислювальної складності застосування до задачі забезпечення функціональної придатності смугового фільтра процедур випадкового пошуку. З порівняльної діаграми видно, що найкращою за обчислювальною складністю до вказаної задачі є процедура випадкового пошуку із використанням направляючого конуса.

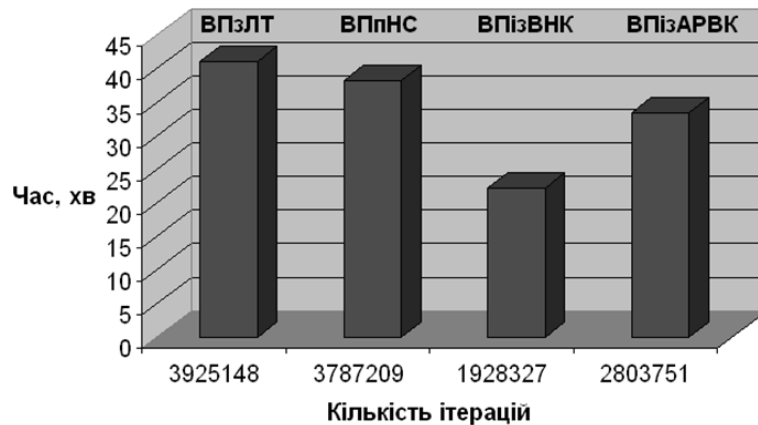


Рис. 3.15. Порівняння обчислювальної складності процедур випадкового пошуку

Рисунок 3.16 демонструє «історію» пошуку оптимального вектора параметрів компонентів фільтра та їх допусків у просторі параметрів.

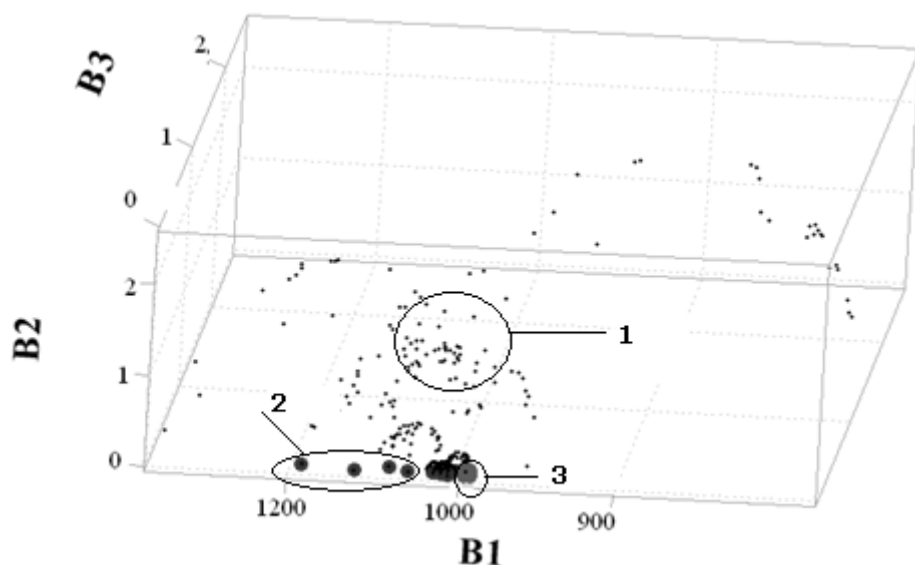


Рис. 3.16. «Історія» пошуку оптимального вектора параметрів з допусками:

- 1 – згенеровані точки, які не покращували значення функції мети;
- 2 - згенеровані точки, які покращували значення функції мети;
- 3 – точка, яка позначає оптимальний вектор параметрів з допусками

На рисунку 3.16 дрібними точками (1) показані згенеровані випадковим чином, згідно з нормальним законом розподілу, точки обчислення вектора параметрів компонентів системи з допусками, точками середнього розміру(2) – точки, знайдені в процесі виконання процедури, які на певній ітерації покращували значення функції мети, найбільша точка(3) – точка, яка в просторі параметрів задає шуканий інтервальний вектор параметрів компонентів системи з їх допусками.

Таким чином, проведено порівняльний аналіз процедур випадкового пошуку на прикладі розв'язання задачі забезпечення функціональної придатності смугового фільтра методом забезпечення функціональної придатності статичних систем, який ґрунтується на розв'язуванні ІСНАР (3.24) і забезпечує одночасне знаходження оптимальних параметрів компонентів смугового фільтра та їх допусків. Показано, що обчислювальна складність реалізації методу забезпечення функціональної придатності на основі процедури випадкового пошуку із використанням направляючого конуса більше ніж на 47% менша від інших представлених процедур.

Отже, при проектуванні та розробці програмного комплексу для реалізації вищезазначеного методу доцільно застосовувати саме цю процедуру випадкового пошуку.

## Висновки до третього розділу

1. Поставлено задачу забезпечення функціональної придатності статичних систем із врахуванням обмежень на вихідні характеристики системи та одночасним пошуком її оптимальних параметрів. Показано, що для розв'язання задачі застосовуються методи випадкового пошуку.

2. Розроблено метод забезпечення функціональної придатності статичних систем на основі аналізу інтервальних даних, який, на відміну від існуючих, ґрунтується на розв'язуванні інтервальної системи нелінійних алгебричних рівнянь і одночасно враховує обмеження на вихідні характеристики системи та забезпечує оцінювання оптимальних параметрів.

3. Розроблено метод забезпечення функціональної придатності статичних систем на основі аналізу інтервальних даних, який дає можливість одночасного знаходження оптимальних параметрів статичних систем та їх допусків. На тестовому прикладі порівняння обчислювальної складності застосування різних процедур випадкового пошуку для розв'язання задачі забезпечення функціональної придатності показано, що складність процедури на основі направляючого конуса Растрігіна на 91% нижча, ніж при використанні методу випадкового пошуку із лінійною тактикою, на 65% нижча, ніж при використанні методу випадкового пошуку за найкращою спробою та на 47% нижча, ніж при використанні методу випадкового пошуку із адаптацією випадкового кроку.

4. Запропоновано при проектуванні та розробці програмного продукту для реалізації методу забезпечення функціональної придатності статичних систем на основі аналізу інтервальних даних, який дає можливість одночасного знаходження оптимальних параметрів статичних систем та їх допусків, застосовувати процедуру випадкового пошуку із використанням направляючого конуса Растрігіна.

## РОЗДІЛ 4

### ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ПРИДАТНОСТІ СТАТИЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ІНТЕРВАЛЬНИХ ДАНИХ

#### **4.1. Аналіз вимог та проектування програмного забезпечення для моделювання та забезпечення функціональної придатності статичних систем**

Згідно із стандартом вимоги до програмного комплексу можна класифікувати як функціональні вимоги, нефункціональні вимоги і функціональні та не функціональні вимоги предметної області.

Функціональні вимоги описують внутрішню роботу системи, її поведінку, маніпулювання даними, опрацювання даних, і інші специфічні функції, які повинна виконувати система. Функціональні вимоги визначають, що саме система повинна виконувати, а нефункціональні визначають, якою вона повинна бути [54].

Нефункціональні вимоги можна поділити на дві категорії: покращення (безпека, надійність, швидкодія, зручність у використанні.) та вдосконалення (масштабування, відновлюваність) властивостей системи.

Функціональні та нефункціональні вимоги предметної області – це характеристики предметної області експлуатації системи.

Розглянемо детальніше нефункціональні вимоги, які повинно забезпечувати розроблюване програмне забезпечення [54]:

1. Система повинна коректно працювати, і вихідні дані системи повинні залежати лише від сукупності вхідних даних, тобто вона повинна бути ізольованою від зовнішніх впливів і результат виконання повинен бути правильним за будь-яких умов (не враховуючи, звісно, похибок, які виникають у результаті обчислень і фактично вже враховані в програмному

комплексі). Результат виконання має залежати лише від вхідних даних, а не від зовнішніх негативних впливів на систему (перевантаження системи, перевантаження передавального середовища).

2. Захищеність від несанкціонованого доступу – не критична і не є не обхідною, оскільки програма лише здійснює математичні обрахунки, виводить результати (в тестовому і графічному форматі), а не зберігає приватну інформацію.

3. Програмна надійність – система повинна бути стійкою до різноманітних впливів із боку користувача. Потрібно передбачити якомога більшу кількість виняткових ситуацій, які може виконати користувач і які можуть призвести до некоректної роботи програми і при їх виникненні виконати відповідні дії для зберігання стабільної і адекватної, а головне, коректної роботи системи.

4. Зручний графічний інтерфейс. Програма повинна мати зручний, дружній інтерфейс, щоб користувач швидко зміг почати виконання своїх завдань. Дизайн програми повинен бути виконаним у спокійних нейтральних тонах, кольори фону і контролів мають бути гармонійно пов'язаними і не викликати в користувача зорового дискомфорту після деякого часу користування програмою.

5. Малі затрати апаратних ресурсів. Система не повинна потребувати значних апаратних затрат комп'ютера і не заважати його високопродуктивній роботі.

6. Мобільність. Програмний продукт повинен бути реалізований таким чином, щоб його можна було використати на будь-якому ПК та займати порівняно невеликий об'єм пам'яті, невелику кількість процесорного часу і інших ресурсів комп'ютера. Це дасть змогу легко використовувати систему як на потужних серверних станціях, так і на невеликих за потужністю робочих комп'ютерах.

7. Мова реалізації – .NET C#. Ця технологія і, зокрема вказана мова програмування, обрана тому, що в ній наявні досить прості для користування

і ефективні засоби проектування обчислювальних систем.

Вище були описані нефункціональні вимоги, поставлені до розроблюваного програмного комплексу. Далі перейдемо до визначення основних функціональних вимог. Для зручності скористаємось UML діаграмою варіантів використання, поданої на рисунку 4.1. Цей тип діаграм відноситься до групи діаграм, які представляють динамічні та поведінкові аспекти створюваного продукту. Це чудовий засіб для досягнення взаєморозуміння між розробниками, експертами і кінцевими користувачами продукту.



Рис. 4.1. Діаграма варіантів використання розроблюваного програмного комплексу

Із діаграми варіантів використання (див. рис. 4.1.) видно, що єдиним користувачем розроблюваної системи буде інженер-спеціаліст, тому встановлення обмежень у вигляді певних авторизаційних моментів та паролів не потрібно. Користувач за допомогою програмного продукту зможе легко вирішувати задачі аналізу та забезпечення функціональної придатності будь-

яких статичних систем для визначення їхньої функціональної придатності. Обов'язковими вхідними даними програмного продукту мають бути значення параметрів (для задачі аналізу) та значення вихідних характеристик (для задачі забезпечення функціональної придатності). Розв'язок задачі аналізу шукається *методом допускового еліпсоїдного оцінювання функціональної придатності статичних систем, який урахує часову зміну параметрів компонентів системи*, а задачі забезпечення функціональної придатності – *методом забезпечення функціональної придатності на основі аналізу інтервальних даних з урахуванням одночасного знаходження оптимальних параметрів статичних систем та їх допусків*.

Для формулювання структури розроблюваного програмного комплексу найкраще використати UML діаграму класів [54], яка відображає різні взаємозв'язки між такими окремими сутностями предметної області, як об'єкти й підсистеми, а також описує їхню внутрішню структуру й типи відносин. Програмний комплекс складається з трьох основних класів: MainForm, AnalyzForm та ProvideForm (див.рис.4.2).

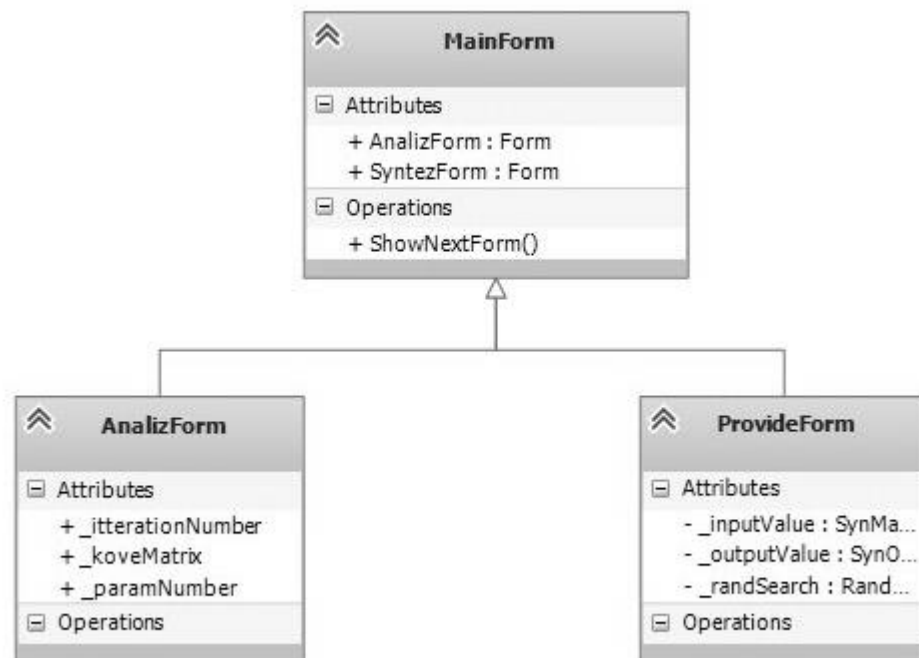


Рис. 4.2. UML діаграма основних класів розроблюваного продукту

На рисунку 4.2. зображений головний клас програми MainForm, який містить весь функціонал програми та два дочірніх класи AnalizForm та ProvideForm, які є головними класами для задачі аналізу та забезпечення функціональної придатності статичних систем відповідно. Розглянемо піддіаграму діаграми класів для розв'язку задачі аналізу (див.рис.4.3).

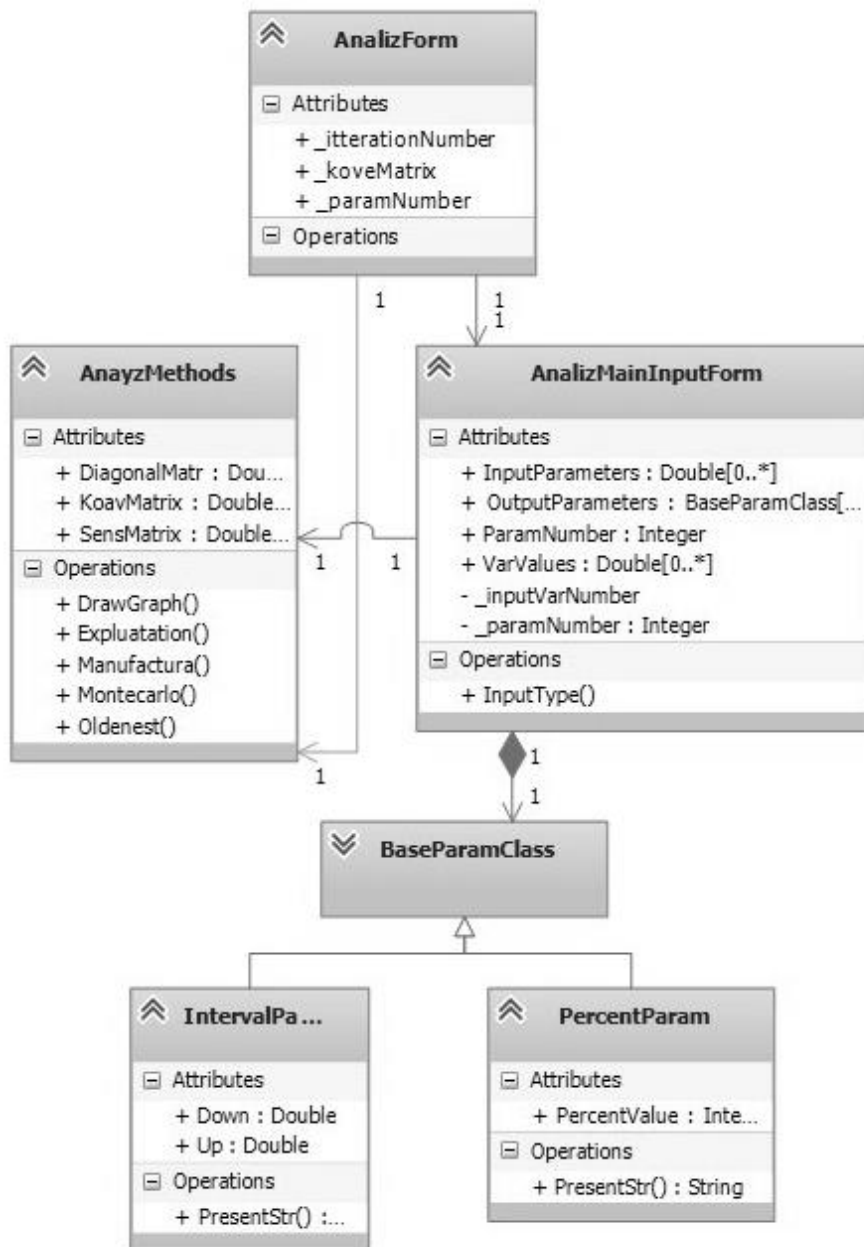


Рис. 4.3. UML діаграма класів задачі аналізу статичної системи

На рисунку 4.3 представлені основні класи, які забезпечуватимуть вирішення задачі аналізу в розроблюваному ПЗ, тобто такі:



- клас `AnalizMainInputForm` відповідає за введення початкових даних у програму: кількості, назв та числових значень вихідних характеристик; кількості, назв та числових значень параметрів елементів; кількості, назв та числових значень вхідних змінних тощо;
- клас `BaseParamClass` відповідає за вигляд уведених даних: відсотковий інтервал відхилення параметрів чи характеристик від номінальних значень (клас `PercentParam`) або інтервальний, якщо відхилення від номінальних значень нерівномірні (клас `IntervalParam`);
- клас `AnalyzMethods` отримує від класу `AnalizMainInputForm` діагональну матрицю, коваріаційну матрицю та матрицю чутливості, обраховані стосовно уведених вхідних даних, котрі подаватимуться на вхід методу допускового еліпсоїдного оцінювання функціональної придатності статичних систем, який ураховує часову зміну параметрів компонентів системи.

Тепер розглянемо піддіаграму діаграми класів для розв'язку задачі забезпечення функціональної придатності статичної системи. На рисунку 4.4 подані основні класи, які забезпечуватимуть розв'язування задачі забезпечення функціональної придатності в розроблюваному програмному продукті, тобто такі:

- клас `BaseParamClass` – спільний клас, який використовується і при розв'язуванні задачі аналізу статичної системи, та виконує такий же функціонал у задачі забезпечення функціональної придатності системи;
- клас `SynteMainInputForm` відповідає за ввід структури за якою моделюватимуть поведінка об'єкта, кількості шуканих параметрів та способу їх задання (інтервальний чи відсотковий), а також за ввід вхідних змінних;
- клас `SynteOutputValueForm` відповідає за ввід вихідних характеристик статичної системи, їх кількості, назв та числових значень, поданих у інтервальному чи відсотковому вигляді;
- клас `RansomSearch` отримує на вхід уведені початкові вхідні та вихідні дані і додатково, перш ніж викликати метод забезпечення функціональної

придатності на основі аналізу інтервальних даних, який дає можливість одночасного знаходження оптимальних параметрів та умов забезпечення заданої функціональної придатності систем, визначається початковий вектор параметрів, числове значення радіуса руху, кількість випадковим чином згенерованих точок та початкову кількість ітерацій;

- клас IntervalCalculation відповідає за всі операції, які проводяться в методі над інтервалами.

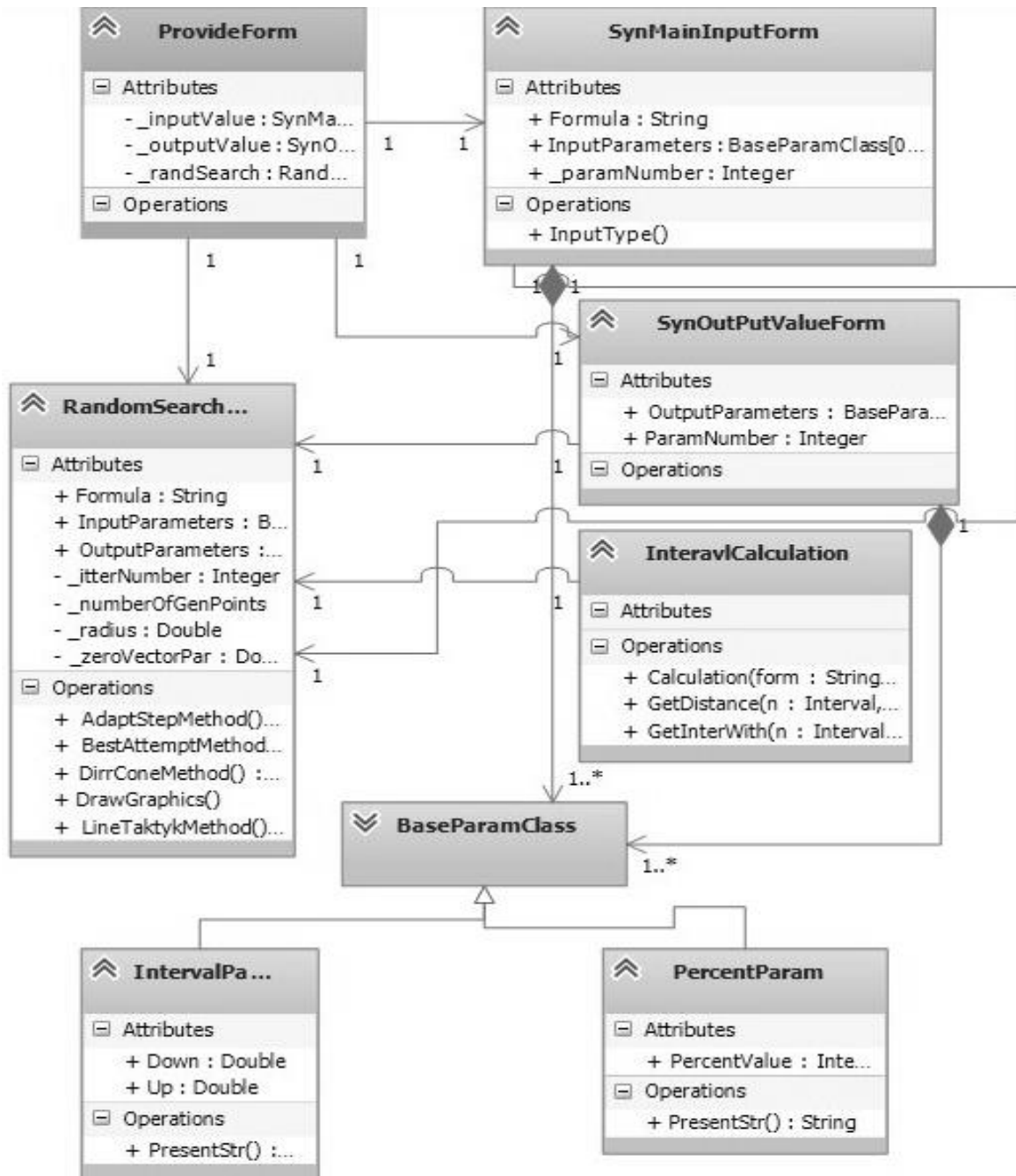


Рис. 4.4. UML діаграма класів задачі забезпечення функціональної придатності статичної системи

На рисунку 4.4 представлені основні класи, які забезпечуватимуть рішення задачі забезпечення функціональної придатності в розроблюваному програмному продукті, а саме такі:

- клас `BaseParamClass` – спільний клас, який використовують і при розв’язуванні задачі аналізу статичної системи та задачі забезпечення функціональної придатності системи;
- клас `SynteMainInputForm` відповідає за ввід структури за якою моделюватиметься поведінка об’єкта, кількості шуканих параметрів та способу їх задання (інтервальний чи відсотковий), а також за ввід вхідних змінних;
- клас `SynteOutputValueForm` відповідає за ввід вихідних характеристик статичної системи, їх кількості, назв та числових значень, поданих у інтервальному чи відсотковому вигляді;
- клас `RansomSearch` отримує на вхід введені початкові вхідні та вихідні дані і додатково, перш ніж викликати метод забезпечення функціональної придатності на основі аналізу інтервальних даних, який дає можливість одночасного знаходження оптимальних параметрів та умов забезпечення заданої функціональної придатності систем, визначається початковий вектор параметрів, числове значення радіуса руху, кількість випадковим чином згенерованих точок та початкову кількість ітерацій;
- клас `IntervalCalculation` відповідає за всі операції, які проводяться в методі над інтервалами.

Для написання програми була обрана мова програмування `.Net C#`, оскільки вона є дуже зручним і ефективним засобом для розробки програм як для `Windows`, так і для `Internet`, а також з її використанням робота з базами даних різних провайдерів значно полегшується.

Мова програмування `C#` створена компанією `Microsoft` для підтримки платформи `Framework. Net`. Вона є спадкоємцем таких відомих мов програмування, як `C` та `C++` і тісно пов’язана з відомою мовою програмування `Java`. Тобто програміст, який знає `C`, `C++` або `Java`, легко може

освоїти С# і почати використовувати усю потужність і зручність зазначеної мови програмування.

Останнім етапом у проектуванні програмного комплексу є проектування бази даних для збереження основних результатів розв'язання поставлених задач. Добре спроектована база даних – запорука надійного функціонування системи і її стійкості при збільшенні розмірів даних, що зберігаються.

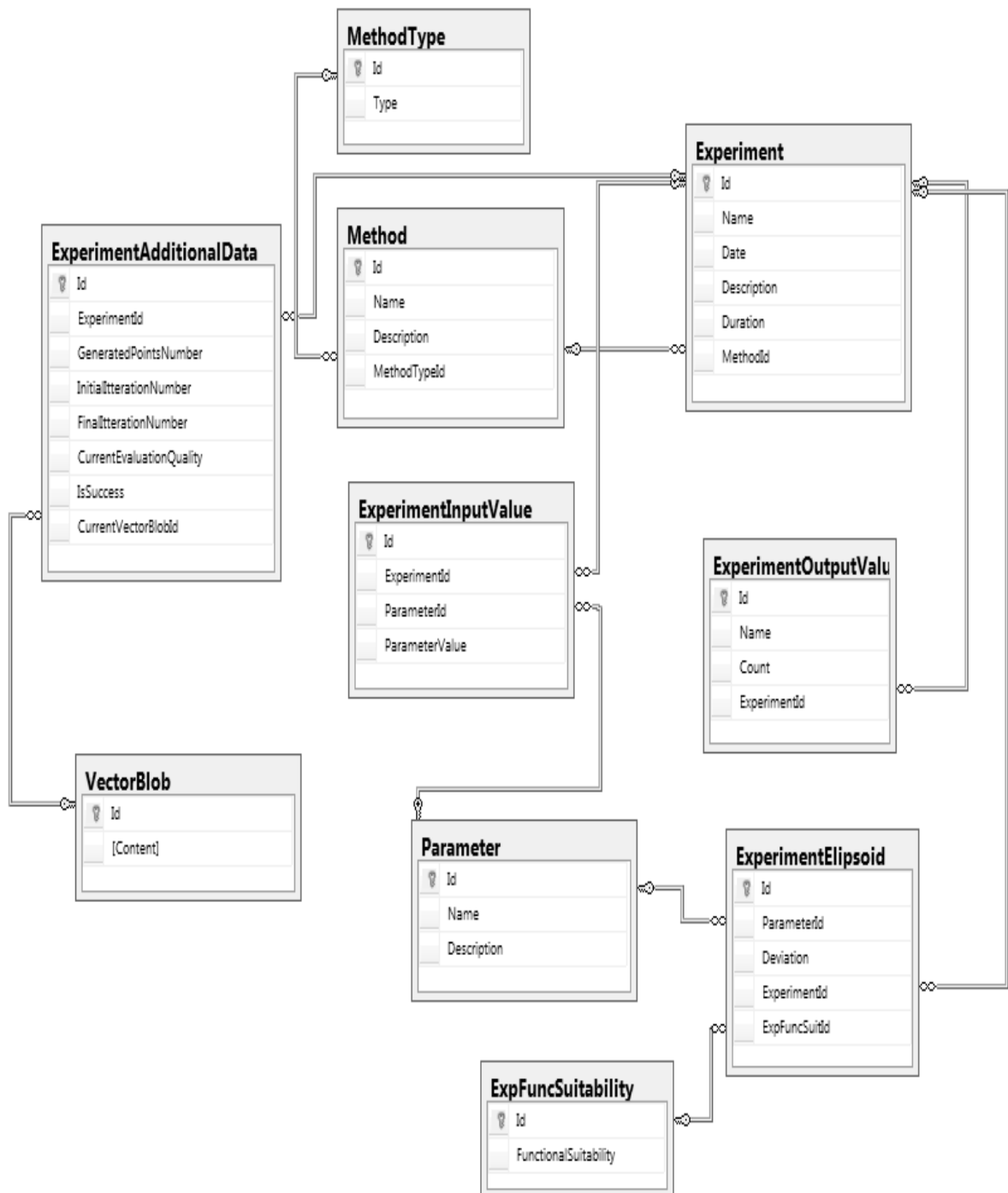


Рис.4.5. ER-діаграма бази даних програмного комплексу

На рисунку 4.5 наведена реляційна модель бази даних, яка є централізованим сховищем відношень, що забезпечує безпечний доступ до інформації з боку користувача. Розроблювана база даних повинна містити інформацію про введені початкові дані (параметри, їх значення, відхилення), вхідні змінні та вихідні дані, обраний метод розв'язування задачі аналізу чи забезпечення функціональної придатності і його особливості (наприклад, для процедури випадкового пошуку радіуса, кількості згенерованих точок, кількості ітерацій, якості оцінювання тощо), основні результати виконаного експерименту: його тривалість, дату проведення і певні примітки. У рядках відношень частина полів містить дані, приналежні безпосередньо до запису, а частина – посилання на записи інших відношень. Таким чином, зв'язки між відношеннями є невід'ємною властивістю реляційної моделі. Така модель дозволяє уникати дублювання даних в базі.

Одними з основних відношень є `Experiment`, `ExperimentInputValue` та `ExperimentAdditionalData`. Перше містить інформацію про назву, дату проведення, певні нотатки та тривалість проведення експерименту при обраному методі, друге – про параметри та їх значення, які були використані при проведенні певного експерименту та третє (актуальне лише для процедури випадкового пошуку розв'язування задачі забезпечення функціональної придатності систем) – про кількість випадкового згенерованих точок (`GeneratedPointsNumber`), про початково задану та кінцеву кількість ітерації (`InitialIterationNumer` та `FinalIterationNumer`), досягнуту якості оцінювання за пройденою кількістю ітерацій (`CurrentEvaluationQuality`), відмітку про успішність виконання (`IsSuccess`) та зображення отриманого вектора параметрів (`CurrentVectorBlobId`).

Після визначення всіх вимог до програмного продукту та опису діаграми класів його структури, перейдемо безпосередньо до реалізації.

## **4.2. Моделювання та забезпечення функціональної придатності системи підготовки гіпсоводної суміші в процесі виготовлення гіпсокартону**

### **4.2.1. Особливості технологічного процесу та його основні параметри**

Гіпсокартон є одним із найбільш поширених облицювальних матеріалів у будівництві [126]. Як вихідні матеріали для виготовлення гіпсокартонних плит використовують напівводяний гіпс ( $\text{CaSO}_4(0,5-0,7)\text{H}_2\text{O}$ ), добавки для прискорення чи сповільнення процесу затвердіння гіпсоводної суміші, піноутворювачі та високоякісний багат шаровий пресований картон товщиною не більше 0,6 мм. Напівводяний гіпс одержують із природного гіпсу шляхом випалювання. Одним із найбільших виробників гіпсокартону є фірма KNAUFF. На підприємствах згаданої компанії функціонують високотехнологічні лінії з виробництва гіпсокартонних плит. Схематично розглянемо устаткування для виготовлення гіпсокартону.

Гіпсокартонні плити виготовляють за безперервною технологією на великих конвейєрних установках. Найважливіші ділянки технологічної лінії з виробництва гіпсокартонних плит (деталю див. рисунок 4.6) такі: підготовка гіпсоводної суміші та подача її на формувальний стіл; формування полотна (гіпсового осердя, обклеєного з обох боків картоном); затвердіння полотна гіпсу в процесі переміщення на стрічковому конвеєрі; порізка полотна на листи; розподіл листів за допомогою консольного конвеєра; сушка листів у сушарці з подальшим вивантаженням, контролем якості та складуванням.

Підготовка гіпсо-водної суміші здійснюється за рахунок подачі подрібненого гіпсо-порошку з бункера 2 у змішувач 6 разом із водою та компонентами з резервуарів 4, 5, зокрема крохмалем, волокном, в'язучими та піноутворюючими речовинами, які надають гіпсо-водній суміші еластичності та клейкості. Зауважимо, що в масі готового виробу 93% гіпсу, 6% - картон та 1% інших компонентів та вологи [115,119].

Формування полотна здійснюється наступним чином. Із машини подачі картону 1 на формувач подають підкладку із картону, на яку викладають гіпсову суміш і формують за допомогою формувача, позначеного цифрою 1 на рисунку 4.6. Тоді сформоване гіпсоводне осердя накривають верхнім шаром картону з машини подачі 8 і завальцовують на нижньому шарі. Попередньо верхній шар картону по краях змащується клеєм із резервуара 7 клейовою машиною. Далі на конвеєрі обидва шари картону завальцовують і отримують полотно гіпсокартону, із товщиною встановленою формувачем 9. Зазначений етап забезпечує допустиму товщину гіпсокартону та надійне приклеювання картону до гіпсового осердя.

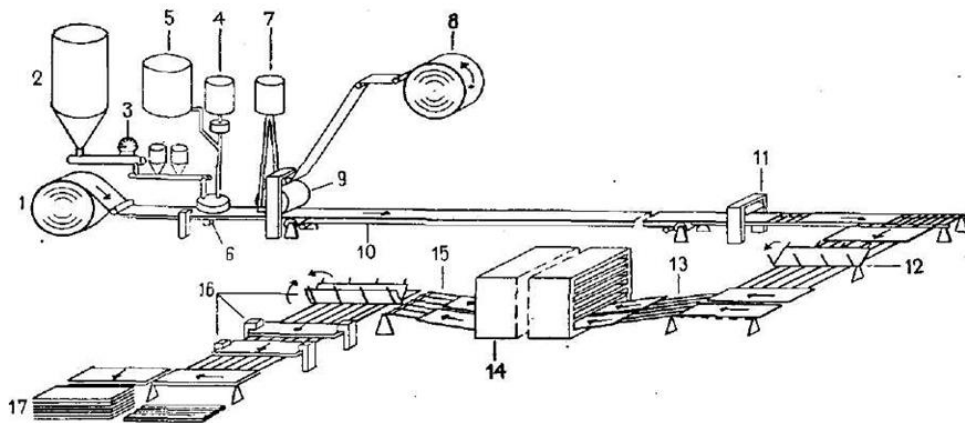


Рис. 4.6. Спрощена схема виробництва гіпсокартонних плит:

1 — машина подачі рулонного картону для лицьової сторони плит; 2 — бункер для гіпсу; 3 — ваговий дозатор; 4, 5 — ємності для води та добавок; 6 — гіпсозмішувач; 7 — ємність для клею; 8 — машина подачі рулонного картону для тильної сторони плит; 9 — формуючий стіл; 10 — стрічковий конвеєр; 11 — відрізний ніж; 12 — кантувач плит; 13 — завантажувальний міст; 14 — сушарка; 15 — вивантажувальний міст; 16 — установка для укладання і пакування; 17 — штабелювальник

На наступному етапі, безпосередньо на стрічковому конвеєрі 10 відбувається рівномірне необхідне затвердіння гіпсу. Цей процес регулюють швидкістю руху стрічки на роликівому конвеєрі в межах від 2м/хв. до 5м/хв.

Коли гіпс набирає необхідної твердості під час руху на стрічковому конвеєрі 10, то надалі здійснюється розділення полотна на листи. Для цього використовується автоматичний різак гільйотинного типу 11. Після чого окремі листи за допомогою консольного конвеєра 13 подають до сушарки 14.

Розподільник розподіляє листи по конвеєрам сушарки із сповільненою швидкістю руху від 0,20 м/хв. до 0,40м/хв. Час перебування листа в сушарці – близько години. Далі плити вивантажують із сушарки пакують і штабелюють [30,126].

Характер затвердіння гіпсового осердя, а також довжина і швидкість руху конвеєра на ділянці затвердіння залежать одна від одної. На великих сучасних установках компанії KNAUFF з високошвидкісним конвеєром довжина ділянок захоплення становить до 300м.

Для виготовлення високоякісного гіпсокартону лінії повністю автоматизовані, а також потрібно чітко дотримуватися технологічних параметрів як обладнання, так і характеристик сировини, наприклад вологості гіпсу, граничного часу його зберігання чи концентрації додатків, що прискорюють чи сповільнюють процес затвердіння гіпсоводної суміші. В Україні також функціонують невеликі підприємства, обладнані лініями, виготовлених в Китаї, для виробництва гіпсокартону з продуктивністю 40-60 плит стандартних розмірів за годину (товщина 9,5мм, довжина 2500мм та ширина 1200мм). Як правило, зазначені лінії є низької вартості і високорентабельні. Одна із таких ліній функціонує в ПП "УКРАЇНСЬКІ ГІПСОКАРТОННІ СИСТЕМИ" на Хмельниччині.



Рис. 4.7. Фрагмент технологічного обладнання, яке забезпечує процес підготовки гіпсоводної суміші та подачі на формувальний стіл



На рисунку 4.7. наведено фрагмент технологічного обладнання, встановленого в цеху підприємства, яке забезпечує процес підготовки гіпсоводної суміші, подачі її на формувальний стіл та формування гіпсокартонної плити. На рис. 4.8 наведено іншу частину технологічного обладнання: конвеєр, на якому затвердіння гіпсоводної суміші та сушіння гіпсокартону.



Рис. 4.8. Конвейєр

Саме ця частина обладнання, яка забезпечує процес підготовки гіпсоводної суміші, подачі її на формувальний стіл та формування гіпсокартонної плити, має ряд недоліків. По-перше, це низький рівень автоматизації. Тобто, в таких лініях відсутні сенсори неперервного контролю якості гіпсоводної суміші на виході із змішувача та пов'язана з цим сенсором автоматична система управління подачі води, гіпсу, піноутворювача та інших додатків к гіпсозмішувач б на рисунку 4.6. По-друге, часто терміни та умови зберігання сировини, зокрема гіпсу, відрізняються від технологічно заданих. На жаль, зазначені недоліки пов'язані між собою, що не дає можливості створити високоефективну автоматичну систему управління процесом забезпечення високої якості

гіпсо-водної суміші. Слід також зазначити, що в даному випадку вказані недоліки не вичерпують увесь перелік і в результаті призводять до зниження функціональної придатності обладнання і, як результат, – якості гіпсокартонних плит, а також створюють проблему потреби періодичного налаштування (переналаштування) обладнання із врахуванням змінних, часто випадкових характеристик сировини. У результаті такого процесу налаштування при запуску лінії від 40 до 80 плит є бракованими, до того ж переналаштування вимагає значних затрат часу, оскільки процеси є інерційними (від моменту підготовки гіпсоводної суміші до виходу готової гіпсокартонної плити – проміжок часу понад 60 хвилин). Тому актуальною є задача моделювання характеристик цієї частини технологічного обладнання та забезпечення його функціональної придатності в умовах змінних характеристик складників для виробництва гіпсокартону.

Розглянемо основні параметри устаткування для підготовки гіпсоводної суміші та формування полотна, які визначають його функціональну придатність в умовах змінних випадковим чином характеристик складників для виготовлення гіпсокартону. Спочатку визначимо характеристики функціональної придатності устаткування. Як бачимо із опису технологічного процесу, характеристикою функціональної придатності лінії можемо вважати допустимий інтервал швидкості руху конвеєрної стрічки, на якій відбувається затвердіння (схвачування) гіпсового осердя, або відповідну характеристику – час затвердіння гіпсового осердя. Ця характеристика буде безпосередньо визначати допустимі межі швидкості руху конвеєрної стрічки, які забезпечують затвердіння гіпсового осердя до моменту його наближення до різака гільйотинного типу. Для лінії виробництва гіпсокартону, встановленої в цеху ПП "УКРАЇНСЬКІ ГІПСОКАРТОННІ СИСТЕМИ" відстань від формувального стола до різака складає 35 метрів. Зауважимо, чим довша конвеєрна лінія, тим більша продуктивність системи. Щоправда кінцевий обсяг виходу готової продукції обмежується продуктивністю сушарки [41]. Водночас, на етапах підготовки гіпсо-водної суміші, подачі її

на формувальний стіл та формування гіпсокартонної плити необхідно забезпечити такі параметри технологічного обладнання, які б своєю чергою забезпечували функціональну придатність системи для різних швидкостей конвейерної лінії.

Позначимо час затвердіння гіпсового осердя для різних швидкостей руху конвейерної лінії за  $t_{v_i}$ , де  $v_i$  – фіксована швидкість руху конвейерної лінії. Тоді умову функціональної придатності технологічного обладнання вище зазначених етапів сформулюємо у такому вигляді:

$$t_{v_i} \in [t_{v_i}^-; t_{v_i}^+], \forall i = 1, \dots, N, \quad (4.1)$$

де  $N$  – кількість заданих режимів роботи конвейерної лінії;  $[t_{v_i}^-; t_{v_i}^+]$  – відомі допустимі нижнє та верхнє значення часу твердіння гіпсового осердя, пов'язані з фіксованими швидкостями руху конвейерної лінії.

Час твердіння гіпсового осердя визначається такими технологічними параметрами обладнання та характеристиками компонент гіпсо-водної суміші: параметрами конвеєрів, швидкостями подачі гіпсу -  $V_1$ , води з розчиненим крохмалем -  $V_2$ , піноутворювача  $V_3$ , повітря  $V_4$  та коректора часу затвердіння  $V_5$ ; характеристики гіпсу, яку визначають як діаметр  $d$  плями розтікання фіксованого об'єму гіпсо-водної суміші в пропорції гіпс/вода=1/0,7, характеристики коректора затвердіння  $\tau$ , яка змінюється в залежності від часу зберігання.

Для визначення характеристик коректора, який відповідає за збільшення або сповільнення часу затвердіння гіпсо-водної суміші, а також визначення його кількісної величини, необхідної для процесу підготовки гіпсоводної суміші, проводять невеликий дослід. А саме, беруть гіпсо-водну суміш в пропорції гіпс/вода=1/0.7 та виливають на поверхню, представлену на рис. 4.9, в центр розграфленого круга.

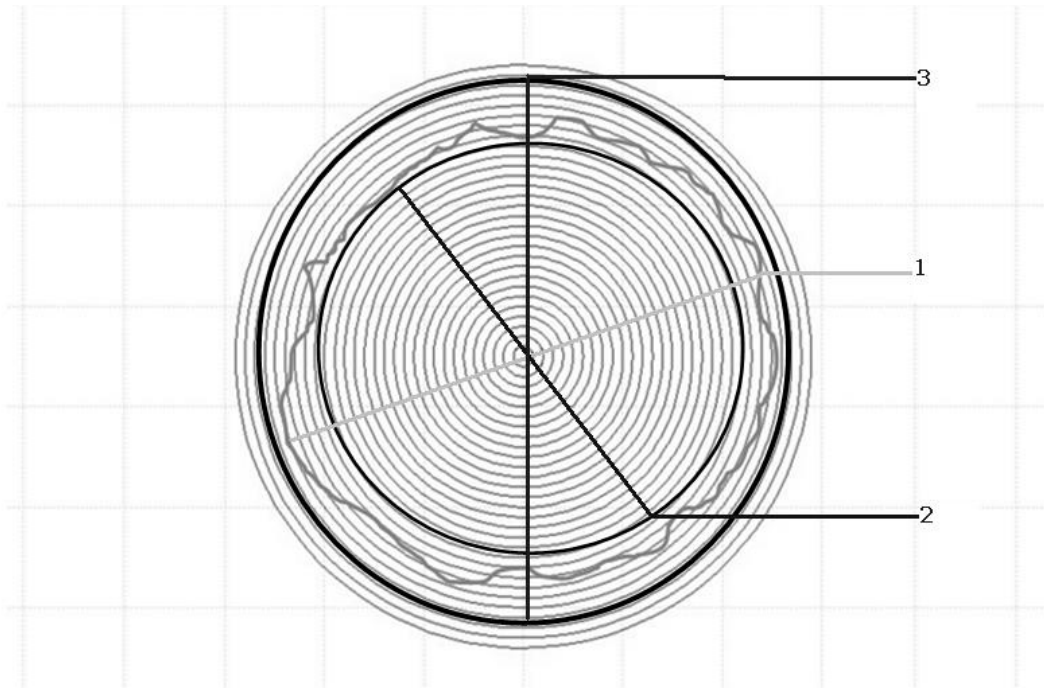


Рис. 4.9. Ілюстрація перевірки якості гіпсо-водної суміші:

- 1- діаметр плями розтікання гіпсо-водної суміші  $d$  ;
- 2- нижня допустима межа плями розтікання гіпсо-водної суміші  $d^-$
- 3- верхня допустима межа плями розтікання гіпсо-водної суміші  $d^+$

При нормальних якісних характеристиках гіпсу діаметр розтікання суміші на поверхні повинен становити від 160 до 170 мм. Для виміру часу затвердіння гіпсоводної суміші на пробу через кожних 20 сек опускають гирю вагою в 3 кг, яка має форму циліндру, діаметр основи якого складає 2,5 – 3см. Після того, як при опусканні кожного разу гирі на зразок на ньому не залишається слідів деформації, вважають, що гіпсо-водна суміш затверділа, та фіксують час затвердіння.

Однак, якщо характеристики гіпсу змінилися для прикладу після тривалого зберігання в складських приміщеннях властивості гіпсо-водної суміші зміняться, що в подальшому може привести до бракованих листів гіпсокартону. Тому в таких випадках до гіпсо-водної суміші додають коректуючої речовини в пропорції 0,00166 грам коректора на 1 кг гіпсу. Процедуру виміру часу затвердіння проби гіпсо-водної суміші повторюють вже з врахуванням коректуючої речовини та вимірюють час затвердіння

суміші.

Різниця між часом затвердіння суміші без коректора та з ним визначатиме характеристику самого коректора.

#### 4.2.2. Математична модель характеристики технологічного процесу

Ураховуючи викладене вище, математичну модель, яка описує залежність між часом затвердіння та чинниками, які його визначають, шукатимемо в такому вигляді:

$$\hat{t}_{v_i} = f(V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, v_i, d, \tau) \quad (4.2)$$

на основі аналізу інтервальних даних [29], оскільки усі зазначені величини отримані експериментальними вимірюваннями з певними похибками. У цьому випадку математична модель (4.2) набуде інтервального вигляду [32]:

$$[\hat{t}_{v_i}^-; \hat{t}_{v_i}^+] = [f^-(V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, v_i, d, \tau); f^+(V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, v_i, d, \tau)] , \quad (4.3)$$

$[f^-(V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, v_i, d, \tau); f^+(V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, v_i, d, \tau)]$  – функціональний коридор інтервальних моделей для часу затвердіння гіпсового осердя;  $[\hat{t}_{v_i}^-; \hat{t}_{v_i}^+]$  – інтервальна оцінка значення часу затвердіння гіпсового осердя.

Тоді умови функціональної придатності обладнання набудуть такого вигляду:

$$[\hat{t}_{v_i}^-; \hat{t}_{v_i}^+] \subset [t_{v_i}^-; t_{v_i}^+], \quad \forall i = 1, \dots, N. \quad (4.4)$$

Тепер підставимо в умови (4.4) замість  $[\hat{t}_{v_i}^-; \hat{t}_{v_i}^+]$ - інтервальних оцінок значень часу затвердіння гіпсового осердя для різних швидкостей конвейера межі функціонального коридору за виразом (4.3) і тоді отримаємо:

$$t_{v_i}^- \leq [f^-(V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, v_i, d, \tau); f^+(V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, v_i, d, \tau)] \leq t_{v_i}^+, \quad \forall i = 1, \dots, N. \quad (4.5)$$

Отримана система, яка визначає умови функціональної придатності технологічного обладнання, є інтервальною системою алгебричних рівнянь. Її розв'язком є область допустимих параметрів обладнання та характеристик складників для виготовлення гіпсокартонних плит.

Таким чином, для побудови моделі та забезпечення функціональної придатності технологічного обладнання лінії з виготовлення гіпсокартону в умовах змінних характеристик сировини необхідно:

- а) на основі аналізу експериментальних інтервальних даних побудувати інтервальну модель у вигляді виразу (4.3);
- б) на основі інтервальної системи алгебричних рівнянь (4.5) обчислити допуски на параметри технологічного обладнання та характеристики складників для виготовлення гіпсокартону.

Для побудови інтервальної моделі проводилося вимірювання часу затвердіння гіпсо-водної суміші для різних значень параметрів технологічного обладнання та характеристик складників гіпсо-водної суміші. Час затвердіння вимірювався з 5% відносною похибкою. У результаті зазначена характеристика подана в інтервальному вигляді:

$$[\tilde{t}_{v_i}^-; \tilde{t}_{v_i}^+] = [t_{v_i} - t_{v_i} \cdot \delta_t; t_{v_i} + t_{v_i} \cdot \delta_t], \quad (4.6)$$

де  $t_{v_i}, \delta_t$  – виміряне значення часу затвердіння гіпсо-водної суміші та відносна похибка його вимірювання відповідно.

Інші характеристики встановлювалися з похибками, які можна не враховувати при побудові моделі. Наприклад, діаметр плями розтікання гіпсо-водної суміші виміряно з точністю до 0,5 мм, що в процентному відношенні максимумально складає 0,4%. Як наслідок, отримано таблицю

вихідних даних, фрагмент якої наведено нижче (див.табл.4.1).

На першому етапі побудови математичної моделі обрано лінійну структуру моделі у такому вигляді:

$$\hat{t}_{v_i} = g_1 \cdot d - g_2 \cdot V_1 + g_3 \cdot V_2 - g_4 \cdot V_5 - g_5 \cdot V_3 + g_6 \cdot V_4 - g_7 \cdot v_i + g_8 \cdot \tau + g_9, \quad (4.7)$$

де  $g_i, i = \overline{1..9}$  – невідомі коефіцієнти, значення яких необхідно оцінити на основі аналізу інтервальних даних наведених в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

## Вимірювання часу затвердіння гіпсоводної суміші

$i$	Діаметр плями розтікання гіпсоводної суміші	Швидкість подачі гіпсу	Швидкість подачі води з розчином крохмалем	Швидкість подачі коректору часу затвердіння	Швидкість подачі піноутворювача	Швидкість подачі повітря	Характеристика коректора затвердіння суміші	Швидкість руху конвеєрної лінії	Інтервальні дані твердіння гіпсоводної суміші
	$d$ , мм.	$V_1$ , кг/хв.	$V_2$ , кг/хв.	$V_5$ , г/хв.	$V_3$ , кг/хв.	$V_4$ , кг/хв.	$\tau$ , хв.	$v_i$ , м/хв	$[\tilde{t}_{v_i}^-; \tilde{t}_{v_i}^+]$ , хв.
1	130	27,2	19,2	0	0,14	0,08	0	8	[3,705; 4,095]
2	130	30,1	18	0	0,14	0,08	0	8	[2,945; 3,255]
3	130	27,0	19,3	0,5	0,14	0,08	3	4	[6,08; 6,72]
4	130	27,1	23,3	0	0,14	0,08	0	8	[4,085; 4,515]
5	140	27,4	19,1	0	0,14	0,08	0	7	[3,99; 4,41]
6	140	32,4	18,1	0	0,14	0,08	0	8	[3,42; 3,78]
7	140	27,4	19,1	0,4	0,14	0,08	2,8	4	[6,65; 7,35]
8	140	27,3	19,5	0,2	0,14	0,08	1,8	6	[4,94; 5,46]
9	150	27,2	19,4	0	0,15	0,08	0	7	[4,37; 4,83]
10	150	27,2	19,4	0	0,20	0,08	0	6	[5,035; 5,565]
11	150	27,3	19,2	0,3	0,15	0,08	2,5	4	[6,175; 6,825]
12	150	27,2	19,4	0	0,10	0,08	0	6	[4,655; 5,145]
13	160	27,2	19,5	0	0,14	0,08	0	4	[6,365; 7,035]
14	160	27,2	19,5	0,1	0,14	0,08	0,5	4	[6,65; 7,35]
15	160	27,2	19,5	0,05	0,14	0,08	0,4	4	[6,745; 7,455]
16	160	27,2	19,1	0,1	0,14	0,08	-2,5	6	[4,845; 5,355]
17	170	27,2	19,5	0	0,14	0,08	0	4	[6,935; 7,665]
18	180	27,0	19,3	0	0,14	0,08	0	3	[7,885; 8,715]
19	180	27,0	19,3	0,3	0,14	0,08	-2	4	[6,555; 7,245]

Тепер, послуговуючись даними таблиці, складемо інтервальну систему лінійних алгебричних рівнянь (ІСЛАР) у вишляді такому вигляді:





відомі допустимі нижнє та верхнє значення часу затвердіння гіпсового осердя, зокрема для швидкості руху конвеєра 1м/хв., час твердіння гіпсового осердя складає [25;31] хв, для 2м/хв. - [12,6;15,6] хв тощо. Отже, інтервальна модель (4.9) набуде вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 25 \leq [1,55;1,69] + [0,029;0,031] \cdot d - [0,056;0,064] \cdot V_1 + [0,13;0,15] \cdot V_2 - \\
 - [0,095;0,105] \cdot V_5 - [6,62;7,03] \cdot V_3 + [18,7;19,9] \cdot V_4 + [0,22;0,24] \cdot \tau \leq 31; \\
 12,6 \leq [1;1,18] + [0,029;0,031] \cdot d - [0,056;0,064] \cdot V_1 + [0,13;0,15] \cdot V_2 - \\
 - [0,095;0,105] \cdot V_5 - [6,62;7,03] \cdot V_3 + [18,7;19,9] \cdot V_4 + [0,22;0,24] \cdot \tau \leq 15,6; \\
 8,37 \leq [0,45;0,67] + [0,029;0,031] \cdot d - [0,056;0,064] \cdot V_1 + [0,13;0,15] \cdot V_2 - \\
 - [0,095;0,105] \cdot V_5 - [6,62;7,03] \cdot V_3 + [18,7;19,9] \cdot V_4 + [0,22;0,24] \cdot \tau \leq 10,23; \\
 6,3 \leq [-0,1;0,16] + [0,029;0,031] \cdot d - [0,056;0,064] \cdot V_1 + [0,13;0,15] \cdot V_2 - \\
 - [0,095;0,105] \cdot V_5 - [6,62;7,03] \cdot V_3 + [18,7;19,9] \cdot V_4 + [0,22;0,24] \cdot \tau \leq 7,7; \\
 5,04 \leq [-0,65;-0,35] + [0,029;0,031] \cdot d - [0,056;0,064] \cdot V_1 + [0,13;0,15] \cdot V_2 - \\
 - [0,095;0,105] \cdot V_5 - [6,62;7,03] \cdot V_3 + [18,7;19,9] \cdot V_4 + [0,22;0,24] \cdot \tau \leq 6,16; \\
 4,23 \leq [-1,2;-0,86] + [0,029;0,031] \cdot d - [0,056;0,064] \cdot V_1 + [0,13;0,15] \cdot V_2 - \\
 - [0,095;0,105] \cdot V_5 - [6,62;7,03] \cdot V_3 + [18,7;19,9] \cdot V_4 + [0,22;0,24] \cdot \tau \leq 5,17; \\
 3,6 \leq [-1,75;-1,37] + [0,029;0,031] \cdot d - [0,056;0,064] \cdot V_1 + [0,13;0,15] \cdot V_2 - \\
 - [0,095;0,105] \cdot V_5 - [6,62;7,03] \cdot V_3 + [18,7;19,9] \cdot V_4 + [0,22;0,24] \cdot \tau \leq 4,4; \\
 3,15 \leq [-2,3;-1,88] + [0,029;0,031] \cdot d - [0,056;0,064] \cdot V_1 + [0,13;0,15] \cdot V_2 - \\
 - [0,095;0,105] \cdot V_5 - [6,62;7,03] \cdot V_3 + [18,7;19,9] \cdot V_4 + [0,22;0,24] \cdot \tau \leq 3,85.
 \end{array} \right. \quad (4.10)$$

Уведемо обмеження на параметри технологічного обладнання та характеристики складників технологічного процесу з метою отримання множини розв'язків ІСЛАР, які відповідають фізичному змісту процесів, тобто введемо допустимі межі на характеристики якості гіпсо-водної суміші (розтікання), на параметри технологічного обладнання щодо швидкості подачі гіпсу, води з розчиненим крохмалем, корегуючої речовини, піноутворювача, повітря та обмеження на характеристику якості корегуючої речовини. Отримаємо таку додаткову систему нерівностей:

$$\left\{ \begin{array}{l} 130 \leq d \leq 180; \\ 15 \leq V_1 \leq 40; \\ 10 \leq V_2 \leq 30; \\ 0 \leq V_3 \leq 0,2; \\ 0,05 \leq V_4 \leq 0,15; \\ 0 \leq V_5 \leq 1; \\ -2 \leq \tau \leq 2. \end{array} \right. \quad (4.11)$$

Доповнимо ІСЛАР (4.10) системою нерівностей (4.11). Отримана система матиме вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} 25 \leq [1,55;1,69] + [0,029;0,031] \cdot d - [0,056;0,064] \cdot V_1 + [0,13;0,15] \cdot V_2 - \\ - [0,095;0,105] \cdot V_5 - [6,62;7,03] \cdot V_3 + [18,7;19,9] \cdot V_4 + [0,22;0,24] \cdot \tau \leq 31; \\ 12,6 \leq [1;1,18] + [0,029;0,031] \cdot d - [0,056;0,064] \cdot V_1 + [0,13;0,15] \cdot V_2 - \\ - [0,095;0,105] \cdot V_5 - [6,62;7,03] \cdot V_3 + [18,7;19,9] \cdot V_4 + [0,22;0,24] \cdot \tau \leq 15,6; \\ 8,37 \leq [0,45;0,67] + [0,029;0,031] \cdot d - [0,056;0,064] \cdot V_1 + [0,13;0,15] \cdot V_2 - \\ - [0,095;0,105] \cdot V_5 - [6,62;7,03] \cdot V_3 + [18,7;19,9] \cdot V_4 + [0,22;0,24] \cdot \tau \leq 10,23; \\ 6,3 \leq [-0,1;0,16] + [0,029;0,031] \cdot d - [0,056;0,064] \cdot V_1 + [0,13;0,15] \cdot V_2 - \\ - [0,095;0,105] \cdot V_5 - [6,62;7,03] \cdot V_3 + [18,7;19,9] \cdot V_4 + [0,22;0,24] \cdot \tau \leq 7,7; \\ 5,04 \leq [-0,65;-0,35] + [0,029;0,031] \cdot d - [0,056;0,064] \cdot V_1 + [0,13;0,15] \cdot V_2 - \\ - [0,095;0,105] \cdot V_5 - [6,62;7,03] \cdot V_3 + [18,7;19,9] \cdot V_4 + [0,22;0,24] \cdot \tau \leq 6,16; \\ 4,23 \leq [-1,2;-0,86] + [0,029;0,031] \cdot d - [0,056;0,064] \cdot V_1 + [0,13;0,15] \cdot V_2 - \\ - [0,095;0,105] \cdot V_5 - [6,62;7,03] \cdot V_3 + [18,7;19,9] \cdot V_4 + [0,22;0,24] \cdot \tau \leq 5,17; \\ 3,6 \leq [-1,75;-1,37] + [0,029;0,031] \cdot d - [0,056;0,064] \cdot V_1 + [0,13;0,15] \cdot V_2 - \\ - [0,095;0,105] \cdot V_5 - [6,62;7,03] \cdot V_3 + [18,7;19,9] \cdot V_4 + [0,22;0,24] \cdot \tau \leq 4,4; \\ 3,15 \leq [-2,3;-1,88] + [0,029;0,031] \cdot d - [0,056;0,064] \cdot V_1 + [0,13;0,15] \cdot V_2 - \\ - [0,095;0,105] \cdot V_5 - [6,62;7,03] \cdot V_3 + [18,7;19,9] \cdot V_4 + [0,22;0,24] \cdot \tau \leq 3,85; \\ 130 \leq d \leq 180; \\ 15 \leq V_1 \leq 40; \\ 10 \leq V_2 \leq 30; \\ 0 \leq V_3 \leq 0,2; \\ 0,05 \leq V_4 \leq 0,15; \\ 0 \leq V_5 \leq 1; \\ -2 \leq \tau \leq 2. \end{array} \right. \quad (4.12)$$

Отже, система (4.12) є моделлю функціональної придатності лінії з підготовки гіпсо-водної суміші в процесі виробництва гіпсокартону.

#### 4.2.4. Метод забезпечення функціональної придатності систем на основі аналізу інтервальних даних, який дає можливість одночасного знаходження оптимальних параметрів і умов забезпечення заданої функціональної придатності систем та його програмна реалізація

Тепер, виходячи з «методу забезпечення функціональної придатності систем на основі аналізу інтервальних даних, який дає можливість одночасного знаходження оптимальних параметрів і умов забезпечення заданої функціональної придатності систем», обчислимо значення параметрів технологічного обладнання, значення характеристик складників технологічного процесу виготовлення гіпсокартону, а також їхні технологічні допуски.

На рисунку 4.10 подана форма введення структури моделі, вхідних параметрів, коефіцієнтів моделі та змінних з можливістю вибору способу введення інтервалу та «визначення відсотку» (застосовують у випадку, коли відхилення значень параметрів чи коефіцієнтів для двох меж однакове).

Рис. 4.10. Форма введення структури моделі

На рисунку 4.11 наведена форма введення параметрів, тобто для кожного параметра системи вводимо мінімальний допуск відхилення його значень від номінальних, при яких система залишатиметься функціонально-придатною. (Величина введеного відсотка визначається технологічно або експертом).

Параметр	% відхилення
d	3
V1	1
V2	1
V3	1
V4	1
V5	1
tau	1

Рис. 4.11. Форма введення параметрів

На рисунку 4.12 проілюстрована форма введення коефіцієнтів моделі, обчислених на основі ІСЛАР(4.8), за допомогою методів аналізу інтервальних даних та представлених виразом (4.9).

Параметр	Інтервал
g1	[0.029, 0.031]
g2	[0.056, 0.064]
g3	[0.13, 0.15]
g4	[0.095, 0.105]
g5	[6.62, 7.03]
g6	[18.7, 19.9]
g7	[0.51, 0.55]
g8	[0.22, 0.24]
g9	[2.1, 2.2]

Рис. 4.12. Форма введення коефіцієнтів моделі

На рисунку 4.13 подана форма введення змінних моделі, тобто швидкості руху конвеєрної лінії від 1 до 8 м/хв. Оскільки швидкість конвеєрної лінії має сталі значення, то при інтервальному поданні змінної верхня та нижня межа матимуть одне і те ж значення.

Рис. 4.13. Форма введення значень змінних моделі

На рисунку 4.14(а) подана форма введення вихідних характеристик, зокрема вихідною характеристикою є час затвердіння гіпсо-водної суміші при різних швидкостях руху конвеєрної лінії, на рисунку 4.14(б) – його інтервальні значення.

(а)

(б)

Рис.4.14. Форми введення вихідних характеристик:

а) форма введення кількості та способу введення вихідної характеристики;

б) введення інтервальних значень вихідної характеристики

На рисунку 4.15 подана форма введення початкових даних, необхідних для обчислення інтервальних векторів значень параметрів та характеристик системи на основі процедури випадкового пошуку із використанням направляючого конуса.

Рис. 4.15. Форма введення початкових даних для обчислення обраним методом

Початкові введені значення параметрів відповідно до форми ведення поданої на рисунку 4.11, будуть перетворюватися в інтервальний вигляд із вказаним відсотком і подаватися на вхід методу вже в інтервальному вигляді. Нижня смужка демонструватиме хід виконання методу (див. рис. 4.16).

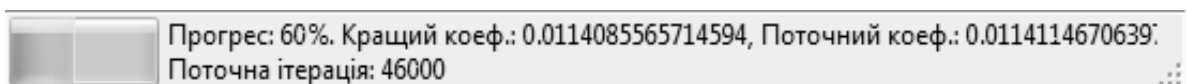


Рис. 4.16. Ілюстрація виконання методу

З рисунку 4.16 бачимо, що за 46.000 ітерацій якість оцінювання досягнута лише показником, який дорівнює 0,011. Після виконання вказаної кількості ітерації і недосягненні якості оцінювання програма видасть повідомлення про невиконання (див. рис. 4.17) та зазначить час роботи програми і поточну якість оцінювання.

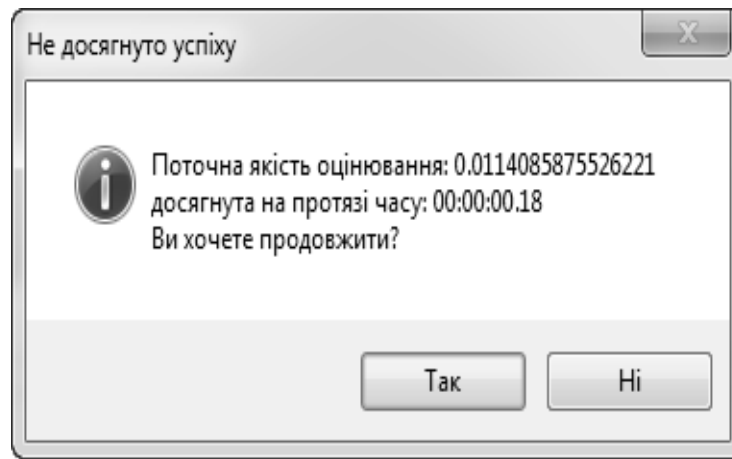


Рис. 4.17. Форма повідомлення програми про невиконання

Результатом застосування вищезазначеного методу забезпечення функціональної придатності на основі аналізу інтервальних даних та розробленого на його основі програмного комплексу є інтервальні вектори значень параметрів та характеристик системи. Результуюча форма виконання методу подана на рисунку 4.18.

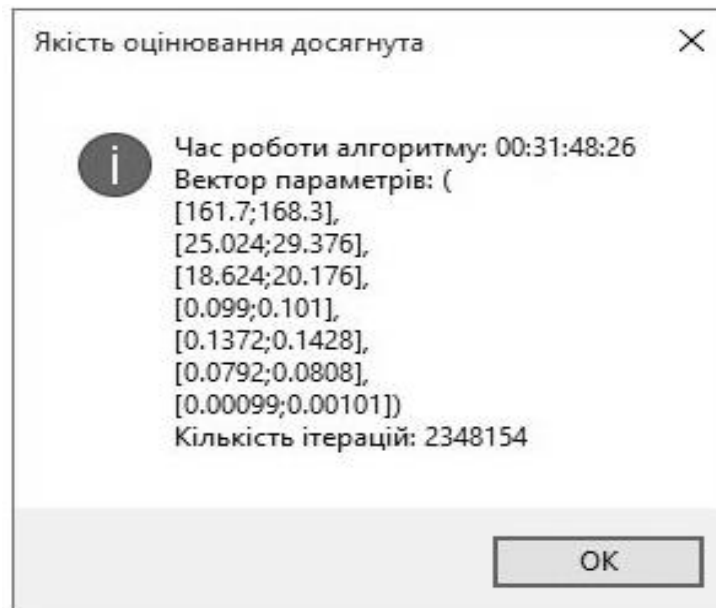


Рис.4.18. Форма подання вектору інтервальних значень параметрів системи

Зокрема обчислені інтервальні вектори таких значень параметрів та характеристик системи, як:

- діаметра плями розтікання гіпсоводної суміші –  $d = [161,7;168,3]$ ;

- швидкості подачі гіпсу –  $V_1 = [25,02;29,37]$ ;
- швидкості подачі води з розчином крохмалем –  $V_2 = [18,62;20,18]$ ;
- швидкості подачі коректора часу затвердіння –  $V_5 = [0,099;0,101]$ ;
- швидкості подачі піноутворювача –  $V_3 = [0,137;0,142]$ ;
- швидкості подачі повітря –  $V_4 = [0,079;0,081]$ ;
- характеристики коректора затвердіння –  $\tau = [0,00099;0,00101]$ .

Отримані допуски як на параметри технологічного обладнання, так і на характеристики складників для виготовлення гіпсокартону повністю відповідають фізичному змісту і забезпечують функціональну придатність лінії з виробництва гіпсокартону. З врахуванням отриманих результатів технологу достатньо переконатися, що характеристики сировини (наприклад, гіпсу) знаходяться в заданих межах і в такому випадку це усуває необхідність додаткового експериментального налаштування технологічного обладнання. На рисунку 4.19 подана карта допустимих технологічних характеристик складників для виробництва гіпсокартону.

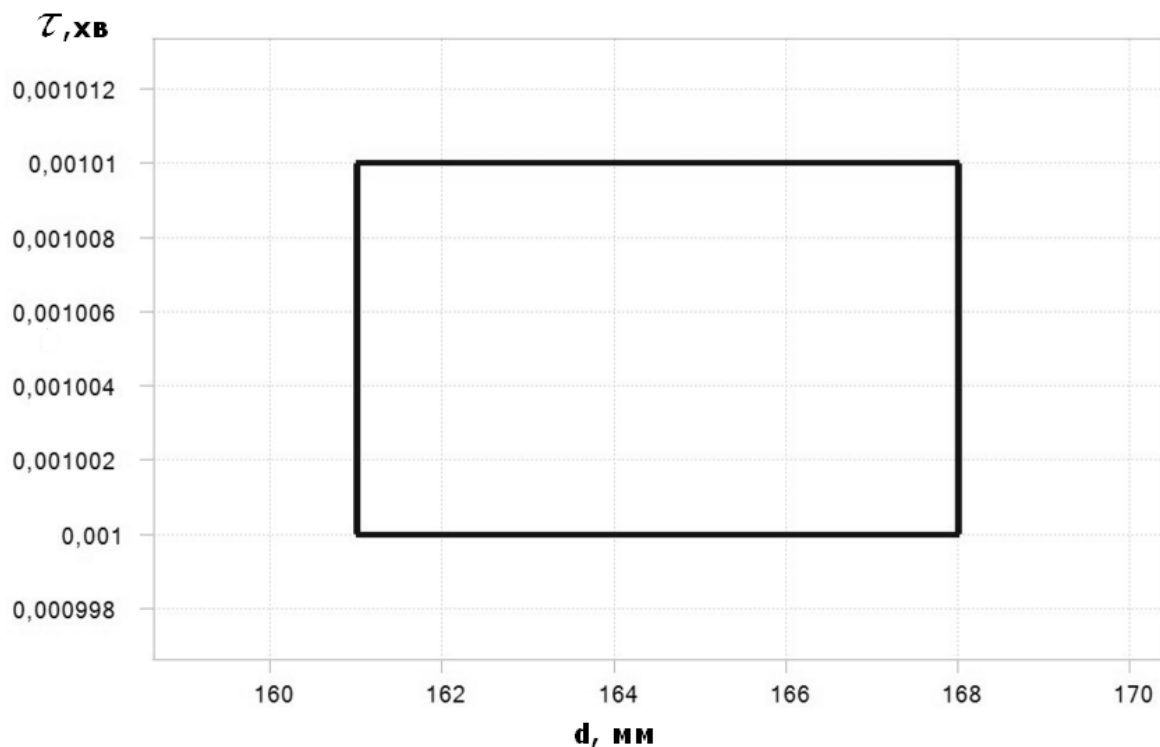


Рис. 4.19. Допустимі технологічні характеристики складників по виробництва гіпсокартону



На рисунку 4.20(а,б,в) подана перша частина карти допустимих технологічних параметрів (основні параметри – швидкість подачі гіпсу  $V_1$  та води  $V_2$ ) лінії з виробництва гіпсокартонних плит, які забезпечують її функціональну придатність.

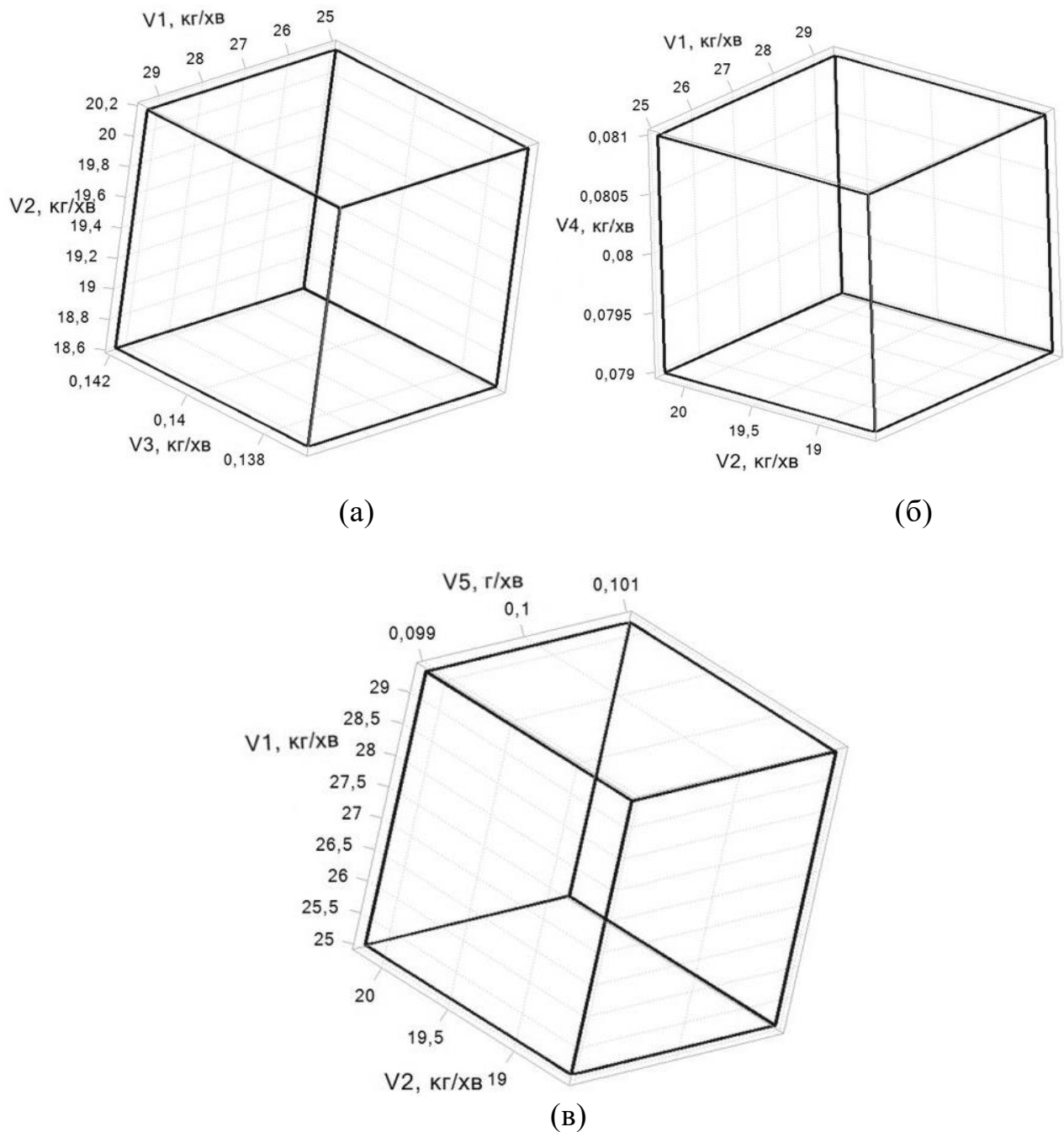


Рис. 4.20. Допустимі технологічні параметри лінії:

а) швидкість подачі гіпсу  $V_1$ , води  $V_2$ , піноутворювача  $V_3$ ;

б) швидкість подачі гіпсу  $V_1$ , води  $V_2$ , повітря  $V_4$ ;

в) швидкість подачі гіпсу  $V_1$ , води  $V_2$ , коректора  $V_5$ .

На рисунку 4.21(а,б,в) подана друга частина карти допустимих технологічних параметрів (основний параметр – швидкість подачі гіпсу  $V_1$ ) лінії з виробництва гіпсокартонних плит, які забезпечують її функціональну придатність.

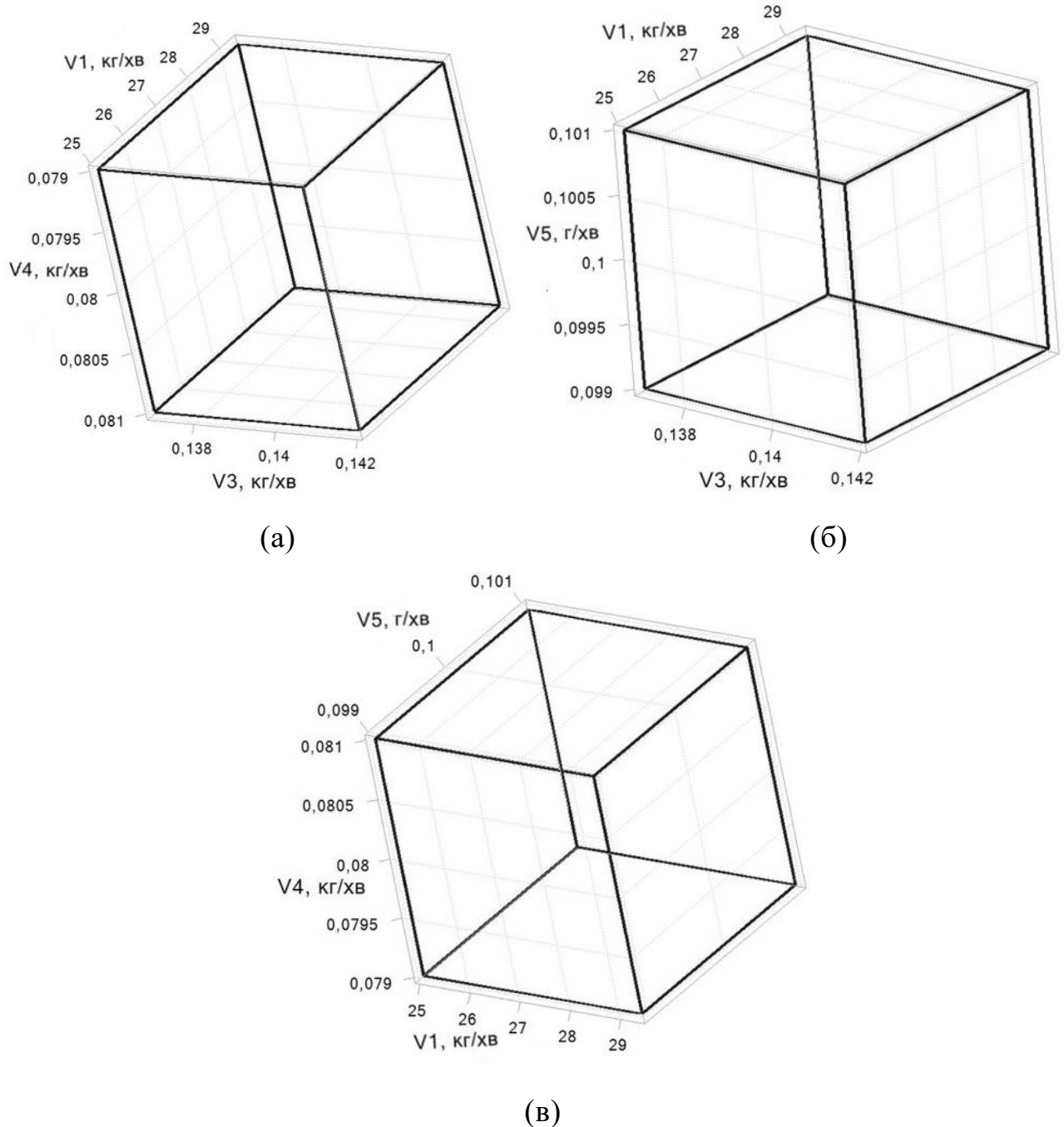


Рис.4.21. Допустимі технологічні параметри лінії:

- а) швидкість подачі гіпсу  $V_1$ , піноутворювача  $V_3$ , повітря  $V_4$ ;
- б) швидкість подачі гіпсу  $V_1$ , піноутворювача  $V_3$ , коректора  $V_5$ ;
- в) швидкість подачі гіпсу  $V_1$ , повітря  $V_4$  коректора  $V_5$ .

На рисунку 4.22(а,б,в,г) подана остання частина карти допустимих технологічних параметрів лінії по виробництву гіпсокартонних плит, які забезпечують її функціональну придатність.

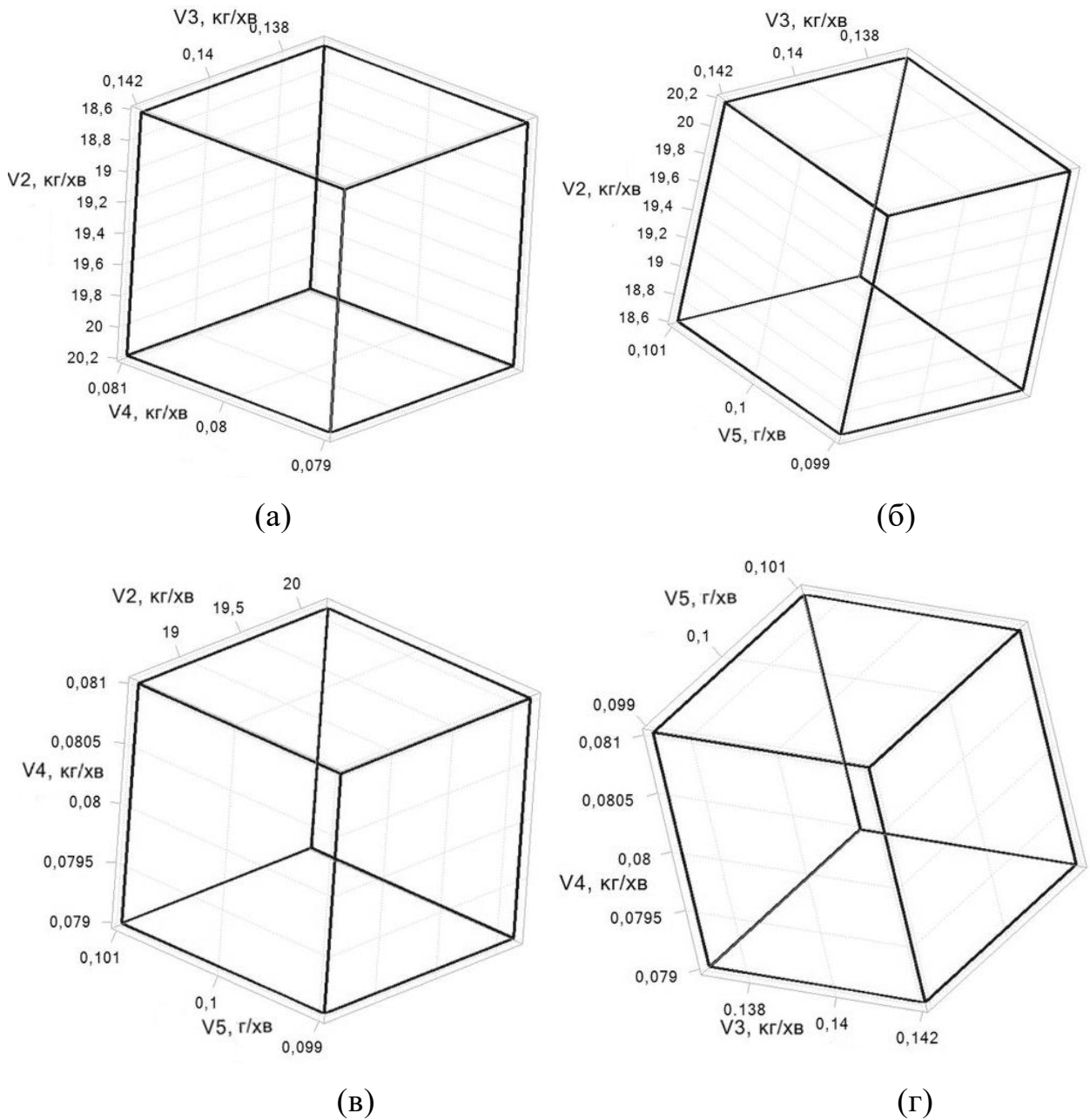


Рис.4.22. Допустимі технологічні параметри лінії:  
 а) швидкість подачі води  $V_2$ , піноутворювача  $V_3$ , повітря  $V_4$ ;  
 б) швидкість подачі води  $V_2$ , піноутворювача  $V_3$ , коректора  $V_5$ ;  
 в) швидкість подачі води  $V_2$ , повітря  $V_4$  коректора  $V_5$ ;  
 г) швидкість подачі піноутворювача  $V_3$ , повітря  $V_4$  коректора  $V_5$ .

Підсумовуючи вищеописаний розділ, який присвячений програмному комплексу реалізації методів моделювання та забезпечення функціональної придатності статичних систем на основі аналізу інтервальних даних, варто відзначити наступне:

- програмний комплекс реалізації моделювання та забезпечення функціональної придатності статичних систем дозволяє користувачеві (інженеру, проектувальнику) розв'язати задачі аналізу та забезпечення функціональної придатності будь-якої технічної системи чи технологічного процесу, враховуючи певні вимоги внесення початкових даних (вхідних параметрів та вихідних характеристик); У випадку розв'язування задачі аналізу залежності між параметрами та вихідними характеристиками повинні бути представлені лінійними алгебричними рівняннями;
- додатково розроблена база даних, яка містить дані, необхідні користувачеві, про проведені експерименти та їх основні характеристики;
- розв'язано актуальне науково-практичне завдання забезпечення функціональної придатності обладнання конвеєрної лінії при організації технологічного процесу виробництва гіпсокартону, що підтверджується актом впровадження на ПП «Українські гіпсокартонні системи» (див. додаток А);
- отримано метод обчислення параметрів статичних систем на основі допускового оцінювання, який забезпечує отримання оптимального вектора параметрів системи з їх допусками при заданій функціональній придатності і метод моделювання та забезпечення функціональної придатності технологічного обладнання лінії з виробництва гіпсокартону;
- побудовано інтервальну модель характеристики гіпсового осердя гіпсокартону, яка визначається часом його затвердіння в залежності від характеристик гіпсу та інших складників;
- застосовано розроблений програмний комплекс для розв'язування вищезазначеної задачі, що дало можливість отримати номінальні значення

та допуски на параметри технологічного обладнання і характеристики складників для виготовлення гіпсокартону, отримані номінальні значення та допуски забезпечують функціональну придатність лінії з виробництва гіпсокартону і дозволяють усунути додаткове експериментальне налаштування технологічного обладнання;

- проілюстровано допускові «карти» технологічних параметрів (див.рис.4.19-4.22), які дозволяють обирати технологічні параметри системи змішування гіпсо-водної суміші у процесі виробництва гіпсокартону, що забезпечують її функціональну придатність.

Отже, розроблені методи, програмний комплекс та математичні моделі дають можливість удвічі зменшити час налаштування технологічної лінії із виробництва гіпсокартону і забезпечують виробництво гіпсокартонних плит без браку.

## Висновки до четвертого розділу

У четвертому розділі розглянуто програмний комплекс реалізації методів моделювання та забезпечення функціональної придатності статичних систем на основі аналізу інтервальних даних. Досягнуто такі результати:

1. Визначені основні функціональні та нефункціональні вимоги до програмного комплексу, які повинні бути реалізовані відповідно до діаграми варіантів використання. За допомогою засобів UML, зокрема діаграми варіантів використання, визначені основні функціональні вимоги до розроблюваного програмного комплексу. За допомогою діаграми класів спроектовано основні модулі реалізації програмного комплексу.

2. Спроектвана та представлена за допомогою реляційної моделі база даних зберігання основних результатів проведених експериментів. База даних створена в середовищі Microsoft SQL Server, адже технологія .NET значно спрощує та пришвидшує розробку програмних продуктів, які працюють з базами даних.

3. Апробація комплексу проведена на прикладі моделювання та забезпечення функціональної придатності технологічного обладнання лінії з виробництва гіпсокартону. Отримано метод обчислення параметрів статичних систем на основі допускового оцінювання, який забезпечує отримання оптимального вектора параметрів системи з їх допусками при заданій функціональній придатності і метод моделювання та забезпечення функціональної придатності технологічного обладнання лінії з виробництва гіпсокартону

4. Розроблені в праці математичні моделі функціональної придатності лінії з виробництва гіпсокартону дають можливість суттєво зменшити час налаштування технологічної лінії і практично унеможливити на цій стадії виробництво бракованих гіпсокартонних плит.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково–технічну задачу створення математичних та програмних засобів для моделювання та забезпечення функціональної придатності статичних систем, які б враховували часові зміни параметрів компонентів системи, відзначалися нижчою обчислювальною складністю та давали можливість одночасного знаходження оптимальних параметрів та умов забезпечення заданої функціональної придатності систем на основі аналізу інтервальних даних. При цьому отримані такі наукові та практичні результати.

1. Під час аналізу методів розв'язування задач аналізу та забезпечення функціональної придатності статичних систем показано, що основним їх недоліком є неврахування часових змін параметрів елементів системи під час експлуатації. Дослідження програмних засобів показало, що існує велика кількість програмних комплексів, які дають можливість оцінювати функціональну придатність систем, однак винятково технічних, та спеціалізованих програмних систем для проектування окремих технологічних процесів. Іншим недоліком зазначених програмних засобів є наступне: висока обчислювальна складність реалізованих у них методів; відсутність можливості одночасного знаходження оптимальних параметрів та умов забезпечення заданої функціональної придатності систем.

2. Запропоновано та обґрунтовано метод допускового еліпсоїдного оцінювання функціональної придатності статичних систем, який, на відміну від існуючих, ураховує часову зміну параметрів компонентів системи, що забезпечує обчислення гарантованих оцінок функціональної придатності статичних систем та підвищення ступеня адекватності моделей функціональної придатності. На тестовому прикладі порівняння обчислювальної складності застосування для розв'язання задачі аналізу методів довірчих еліпсоїдів та методу Монте-Карло показано, що обчислювальна складність методу довірчих еліпсоїдів при забезпеченні

однакових умов функціональної придатності у 22 рази нижча, ніж методу Монте-Карло.

3. Розроблено метод обчислення параметрів статичних систем на основі аналізу інтервальних даних, який, на відміну від існуючих, ґрунтується на розв'язуванні інтервальної системи нелінійних алгебричних рівнянь і одночасно враховує обмеження на вихідні характеристики системи та забезпечує оцінювання оптимальних параметрів.

4. Розроблено метод забезпечення функціональної придатності статичних систем на основі аналізу інтервальних даних, який дає можливість одночасного знаходження оптимальних параметрів та умов забезпечення заданої функціональної придатності систем. На тестовому прикладі порівняння обчислювальної складності застосування різних процедур випадкового пошуку для розв'язання задачі забезпечення функціональної придатності показано, що складність процедури на основі направляючого конуса Растрігіна на 91% нижча, ніж при використанні методу випадкового пошуку із лінійною тактикою, на 65% нижча, ніж при використанні методу випадкового пошуку за найкращою спробою та на 47% нижча, ніж при використанні методу випадкового пошуку із адаптацією випадкового кроку.

5. За допомогою засобів UML, зокрема діаграми варіантів використання, визначені основні функціональні вимоги до розроблюваного програмного комплексу. За допомогою діаграми класів спроектовано основні модулі реалізації програмного комплексу. У дисертаційній роботі розроблено на мові програмування C# та протестовано на прикладах моделювання функціональної придатності радіоелектронних кіл програмний комплекс для моделювання та забезпечення функціональної придатності статичних систем.

6. Програмний комплекс апробовано на ПП «Українські гіпсокартонні системи» та на підприємстві ТОВ ТКБР «Стріла». Застосування комплексу дало можливість обчислити значення параметрів технологічного обладнання, значення характеристик складників технологічного процесу, а також їх технологічні допуски. Отримані номінальні значення та допуски



забезпечують функціональну придатність лінії з виробництва гіпсокартону, що дозволяє усунути додаткове експериментальне налаштування технологічного обладнання. Застосування програмного комплексу для моделювання та забезпечення функціональної придатності радіоелектронних кіл дало змогу підвищити їх функціональну придатність та визначення допусків на параметри їх компонентів.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Аббасов М.Э. Методы оптимизации: Учеб.пособие /М.Э.Аббасов// Спб.: Издательство «ВВМ», – 2014. – 64с.
2. Аксенов А.И. Элементы схем бытовой радиоаппаратуры (конденсаторы резисторы). Справочник /А.И.Аксенов, А.В.Нефредов// Москва:Радио и связь, – 1995. – 272с.
3. Алексеев А.А. Идентификация и диагностика систем. Учебник./А.А. Алексеев, Ю.А. Кораблев, М.Ю. Шестопалов// М.: Академия, –2009. – 352с.
4. Алефельд Г. Введение в интервальные вычисления / Г. Алефельд, Ю. Херцбергер// Москва: Мир,– 1987. – 360 с.
5. Бакан Г. М. Аппроксимация пересечения четкого и нечеткого множеств в методе размытых эллипсоидов / Г. М. Бакан, Н. Н. Куссуль // Кибернетика и вычислительная техника. – 1995. – Вып.105. – С. 18–27.
6. Бакан Г. М. Размытые эллипсоидальные множества в задачах нестохастического оценивания / Г. М. Бакан, Н. Н. Куссуль // Автоматика. – 1989. – №5. – С. 11–17.
7. Бакан Г. М. Размытый эллипсоидальный алгоритм фильтрации состояний статического объекта / Г. М. Бакан, Н. Н. Куссуль // Проблемы управления и информатики. – 1996. – №5. – С. 77–93.
8. Бакан Г.М. Теоретико-множественная идентификация линейных объектов в классе размытых эллипсоидальных множеств /Г.М. Бакан, Н.Н.Куссуль // Автоматика. – 1990. – Т.4. – №4. –С.166–170.
9. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс /Б.Банди// Пер.с.анг. Москва: Радио и связь, – 1988. – 128с.
10. Бичков А.А. Надійність систем і пристроїв /А.А. Бичков// Ростов-на-Дону: Навчальний посібник, – 2008. – 84с.
11. Бобало Ю.Я. Математичні моделі та методи аналізу електронних кіл: навч.посібник / Ю.Я.Бобало, Р.І.Желяк, М.Д.Кіселичник, З.О.Колодій,

Б.А.Мандзій, В.М.Якубенко; за ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.Я.Бобала та д-ра техн. наук, проф. Б.А.Мандзія// Львів: Видавництво Львівської політехніки, – 2013. – 320с.

12. Бодянский Е.В. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучения, применения /Е.В.Бодянский, О.Г.Руденко// Харьков:ТЕЛТЕХ, – 2004. – 369с.

13. Бочков А. Ф. Оценивание параметров модели для объектов с интервальной неопределенностью в выходных параметрах /А.Ф.Бочков, М.В.Милевский// Москва, – 1988. – 23 с.

14. Бочков А.Ф. Интервальный анализ как альтернатива регрессионному анализу /А.Ф. Бочков, А.П. Вошинин, Г.Р. Сотиров// Заводская лаборатория. – 1990. – №7. – С. 76 – 81.

15. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов /И.Н.Бронштейн, К.А.Семендяев//13-е изд. Исправленное. – М.: Наука, Гл. ред. физ. – мат. лит., – 1986. – 544 с.

16. Васильев К.К. Методы обработки сигналов: Учебное пособие /К.К.Васильев// Ульяновск, –2001. – 80с.

17. Вентцель Е.С. теория вероятностей и ее инженерные приложения. /Е.С.Вентцель, Л.А.Овчаров// М.:Наука, – 1988. – 480с.

18. Влах И. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем /И.Влах, К.Сингхал// М.: Радио и связь, – 1988. – 560с.

19. Волгов В.А. Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры. /В.А.Волгов// М.:Энергия, – 1977. – 330с.

20. Волосов В. В. Об одном способе построения эллипсоидальных оценок в задачах нестохастической фильтрации и идентификации параметров управляемых систем /В.В.Волосов// Автоматика. – 1991. – № 3. – С. 24–32.

21. Волосов В. В. Робастные алгоритмы эллипсоидального оценивания состояния многомерных нестационарных непрерывных динамических систем /В.В.Волосов// Проблемы управления и информатики. – 1999. – № 1. – С. 38–53.

22. Волосов В.В. К построению параметрических семейств эллипсоидальных оценок и их оптимизации в задачах нестохастической идентификации параметров и состояния многомерных дискретных объектов управления /В.В.Волосов// Проблемы управления и информатики. – 1996. – №4. – С. 37–54.
23. Воцинин А. П. Интервальный анализ: развитие и перспективы /А.П. Воцинин // Заводская лаборатория. – 2002. – №1. – С. 118-126.
24. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц /Ф.Р.Гантмахер// М.:Наука, –1967. – 575с.
25. Дворкін Л.Й. Опоряджувальні матеріали і вироби /Л.Й.Дворкін// Навч. Посібник – 2-ге вид. Перероб. – К.: Вища шк., – 1996. – 335с.
26. Дивак М. П. Допустиме оцінювання множини параметрів статичної системи в класі багатомірних еліпсоїдів/М.П.Дивак// Комп'ютинг, – 2002. – Том 1. – №1. – С.108-114.
27. Дивак М.П. Вирішення задач синтезу допусків на параметри РЕК методом допускового еліпсоїдного оцінювання з використанням паралельних обчислень. /М.П.Дивак, С.Я.Максимова// Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: Матеріали Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів АСІТ'2011. – Тернопіль: Економічна думка, – 2011. – С.97-101.
28. Дивак М.П. Властивості інтервальних моделей при інтервальній формі їх параметрів /М.П.Дивак// Сб. науч. тр. международного науч.-учеб. центра информ. технологий и систем, науч. совет НАН Украины по пробл. “Кибернетика”. Моделирование и управление состоянием эколого-экономических систем региона. – Киев, – 2001. – С.58-63.
29. Дивак М.П. Задачі математичного моделювання статичних систем з інтервальними даними /М.П. Дивак// Тернопіль: Економічна думка, – 2011.– 216 с.
30. Дивак М.П. Ідентифікація дискретних динамічних моделей процесів з інтервальною невизначеністю у біогазових установках переробки органічного сміття /М.П.Дивак, Є.О.Марценюк, Ю.Р.Піговський, Т.М.Дивак//

Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія “Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка”.– 2010. –Вип 11 (164).–С.181-188

31. Дивак М.П. Кількісні характеристики оцінки якості структури моделі у вигляді інтервального різницевого оператора /М.П.Дивак, Т.М.Дивак, І. Ф.Войтюк// Відбір і обробка інформації. Міжвідомчий збірник наукових праць. – Вип. 34 (110). – 2011.

32. Дивак М.П. Моделювання та забезпечення функціональної придатності технологічного обладнання лінії по виготовленню гіпсокартону в умовах змінних характеристик сировини /М.П.Дивак, С.Я.Крепич, Т.М.Дивак, В.І.Манжула// Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: Хмельницьк. – 2015.– Вип.3(52).– С.186-193.

33. Дивак М.П. Оптимальна процедура налаштування параметрів методу ідентифікації інтервальної дискретної моделі динамічної системи /М.П.Дивак, Є.О. Марценюк, І.Ф. Войтюк// Відбір та обробка інформації.– 2008. – Вип 27 (103). – С.17-23.

34. Дивак М.П. Оптимальна процедура налаштування параметрів методу ідентифікації інтервальної дискретної моделі динамічної системи /М.П.Дивак, Є.О. Марценюк, І.Ф. Войтюк// Відбір та обробка інформації. – 2008. – Вип. 27 (103). – С.17-23.

35. Дивак М.П. Організація допусків на параметри радіоелектронних кіл на основі допускового еліпсоїдного оцінювання /М.П.Дивак, І.Я. Співак, Р.П.Шевчук, С.Я.Максимова// Проблемно-наукова міжгалузева конференція «Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, енергетики, економіки, моделювання та управління» (ПНМК-2011), м.Бучач-Яремча, – 2011р. – С.344-349.

36. Дивак М.П. Особливості побудови інтервальної системи алгебричних рівнянь та методу її розв'язку в задачах ідентифікації лінійного інтервального різницевого оператора /М.П. Дивак, Т.М. Дивак// Індуктивне

модельовання складних систем. Збірник наукових праць / відпов. редактор В.С.Степашко – Київ: МННЦ ІТС,– 2009. - Вип.1. – С.35-43.

37. Дивак М.П. Практичні аспекти застосування методу та алгоритму параметричної ідентифікації дискретних динамічних систем з інтервальною невизначеністю /М.П. Дивак, Т.М. Дивак, Ю.Р. Піговський, Є.О. Марценюк// Індуктивне модельовання складних систем. Збірник наукових праць. – К.: МННЦ ІТС, 2010. – Вип.2. – С. 39-49.

38. Дивак М.П. Розрахунок функціональної придатності радіоелектронних кіл на основі методу аналізу інтервальних даних /М.П.Дивак// Тез. доп. 4 наук.–техн. конф. "Прогресивні матеріали, технології та обладнання в машино- і приладобудуванні. – Тернопіль: ТДТУ, – 2000. – С.122.

39. Дивак М.П. Ітераційний метод пошуку допустимого розв'язку ІСЛАР в задачах ідентифікації параметрів динамічних моделей “вхід-вихід” /М.П. Дивак, П.Г. Стахів, І.Я. Каліщук// Відбір та обробка інформації. – 2005. – Випуск 23 (99). – С. 40-48.

40. Дивак М.П. Удосконалений метод допустимого оцінювання розв'язку ІСЛАР при ідентифікації параметрів динамічних моделей/М.П.Дивак, П.Г.Стахів, І.Я.Максимова// Відбір та обробка інформації. – 2006. – Вип. 26. – С. 27-35.

41. Дивак Т.М. Параметрична ідентифікація інтервального різницевого оператора на прикладі макромоделі розподілу вологості у листі гіпсокартону в процесі його сушіння /Т. М. Дивак// Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія : міжнар. наук.–техн. журнал. – 2012. – Вип. 3. – С. 79–85.

42. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ /Н. Дрейпер, Г.Смит// В 2-х кн. – М.: Финансы и статистика, –1986. – кн. 1. – 355с., кн. 2. – 349 с.

43. Душин С.Е. Теория автоматического управления /С.Е.Душин, Н.С.Зотов, Д.Х.Имаев и др.// Учеб. Для вузов. – М.: Высшая школа, –2003. –

567с.

44. Ержан А.А. Исследование переходных процессов в электронных цепях методами математического моделирования /А.А.Ержан// Труды III-ей Международной научно-практической конференции «ИКТ:Образование, наука, инновации». – Алматы, – 2013. – С.417-421.
45. Захаров А.В. Синтез систем управления при интервальной неопределённости параметров их математических моделей /А.В.Захаров, Ю.И.Шокин// Докл.АН СССР. – 1988. – Т. 299 – №2. – С. 292-295.
46. Иваница С.В. Интервальные вычисления в математических пакетах Scilab и Mathematica /С.В.Иваница, А.В.Меркулов, А.Я.Аноприенко// Информатика и компьютерные технологии, материалы VI международной научно-технической конференции, – Донецк:ДонНТУ. – 2010. – С. 240-246.
47. Измаилов А. Ф. Численные методы оптимизации: Учеб. Пособие /А.Ф.Измаилов, М.В.Солодов// М.:ФИЗМАТЛИТ,– 2005. – 304 с.
48. Калмыков С.А. Методы интервального анализа/С.А.Калмыков, Ю.И.Шокин, З.Х.Юлдашев// Новосибирск:Наука, – 1986. – 222с.
49. Козак О.Л. Застосування методів допускового еліпсоїдного оцінювання параметрів інтервальних моделей для задачі візуалізації гортанних нервів /О.Л. Козак, М.П. Дивак, А.В. Пукас// Вісник НУ «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2010. – №680. – С.196-206.
50. Крепич С.Я. Метод синтезу смугового фільтра для заданих обмежень на його модуль коефіцієнта передачі /С.Я.Крепич//Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: Матеріали IV Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів АСІТ'2014. – Тернопіль: Економічна думка, –2014. – С.26-29.
51. Крепич С.Я. Оцінювання часової складності застосування методу Монте-Карло та інтервального аналізу даних для встановлення функціональної придатності РЕК /С.Я.Крепич, І.Я.Співак// Сучасні

комп'ютерні інформаційні технології: Матеріали III Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів АСІТ'2013. – Тернопіль: Економічна думка, –2013. – С.36-37.

52. Крепич С.Я. Порівняльний аналіз методу Монте-Карло та методу довірчих еліпсоїдів при оцінюванні функціональної придатності РЕК /С.Я.Крепич, М.П.Дивак// Індуктивне моделювання складних систем: Київ. – 2013.–Випуск 5. –С.201-212.

53. Крепич С.Я. Порівняльний аналіз часової складності процедур випадкового пошуку в задачі синтезу при заданих допустимих значеннях вихідних характеристик та допусків на параметри його елементів /С.Я.Крепич// Вісник ТНТУ: Науковий журнал, Тернопіль. – 2015.–№1(77). – С.204-219.

54. Крепич С.Я. Програмний комплекс оцінювання функціональної придатності пристроїв при заданих допустимих значеннях вихідних характеристик та допусків на параметри їх елементів /С.Я.Крепич// Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: Матеріали V Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів АСІТ'2015. – Тернопіль, ТНЕУ. – 2015. –С.23-25.

55. Кривошейкин А.В. Точность параметров и настройка аналоговых радиоэлектронных цепей /А.В.Кривошейкин//М.: Радио и связь, –1983.– 136с.

56. Крищенко А.П. Математическая статистика /А.П.Крищенко, В.С.Зарубин// Москва. Издательство МГТУ им.Н.Э.Баумана, –2001. – 424с.

57. Крищук В.М. Інтервальні методи оптимізації допусків /В.М.Крищук, Г.М.Шило, М.П.Гапоненко// Вісн. НУ “Львівська політехніка”. Комп'ютерні системи проектування: Теорія і практика.– 1999.– № 373. – С.196-201.

58. Крищук В.Н. Применение генетического алгоритма в задачах допускового синтеза микрополосковых устройств /В.Н.Крищук, Л.М.Карпуков, Г.Н.Шило, А.Ю.Фарафонов, Б.А.Артюшенко// Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2007. – №5. – С.29-32.



59. Куржанский А.Б. Задача идентификации – теория гарантированных оценок /А.Б. Куржанский// Автоматика и телемеханика. – 1991. – №4. – С.3–26.
60. Ларман К. Примененеие UML 2.0 и шаблонов проектирования /Крэг Ларман// М.: Вильямс, – 2009. – С.736
61. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений / Ю. В. Линник//М. : Физ. мат. изд., –1962. – 187 с.
62. Лоусон Ч. Численное решение задач метода наименьших квадратов / Ч. Лоусон, Р. Хентон//М. : Наука, –1986. –246 с.
63. Манжула В.І. Синтез генетичного алгоритму для задач структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем /В.І.Манжула// Науково-технічний журнал «Вісник Хмельницького національного університету», –2007.– №1. – С.160-165.
64. Михайлов А.В. Точность радиоэлектронных устройств /А.В.Михайлов, С.К.Савин// Москва, –1976. – 214с.
65. Михайлов А.В. Эксплуатационные допуски и надежность в радиоэлектронной аппаратуре/А.В.Михайлов// Москва, –1970. – 216с.
66. Понтрягин Л.С. Математическая теорія оптимальних процесов /Л.С.Понтрягин, В.Г. Болтянский, З.В. Гамкрилидзе, Е.Ф. Мищенко//М.: Физматгиз,– 1961.
67. Попов В.П. Основы теории цепей: Учебник для вузов спец. «Радиотехника» /В.П.Попов// М.: Высш.школа, –1985. – 496с.
68. Разевиг В.Д. Система схемотехнического моделирования и проектирования печатных плат DesignCenter (PSPICE) /В.Д.Разевиг// Москва, – 1996. – 337с.
69. Растрингин Л.А. Адаптация сложных систем /Л.А. Растрингин// Рига: Зинатне, –1981. – 359 с.
70. Растрингин Л.А. Введение в идентификацию объектов управления /Л.А. Растрингин, Н.Е. Маджаров// М.: Энергия, – 1987. – 216 с.
71. Рвачев В.Л. Теория R-функций и некоторые приложения

/В.Л.Рвачев// Киев: Наук.думка, – 1982. – 552с.

72. Слепова С.В. Основы теории точности измерительных приборов: Учебное пособие /С.В.Слепова// Челябинск:Изд-во ЮУрГУ, – 2008. – 192с.

73. Співак І.Я. Оптимізація допусків на параметри радіоелектронних кіл методом допускового еліпсоїдального оцінювання /І.Я.Співак, С.Я.Максимова// Вісник ТНТУ. – 2012. – Том 65. – №1. – С.187-195.

74. Стахів П.Г. Синтез радіо-електронних кіл при заданих обмеженнях на вихідні характеристики та за умов заданих допусків на параметри елементів / П.Г.Стахів, С.Я.Крепич, М.П.Дивак// Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: Хмельницьк. – 2014. – Вип.3(48).–С.39-48.

75. Туркельтауб Р.М. Методы исследования точности и надежности схем аппаратуры /Р.М.Туркельтауб// Рипол Классик, – 2013. – 168с.

76. Уве Наундорф. Аналоговая электроника. Основы, расчет, моделирование /Уве Наундорф// Москва: Техносфера, – 2008. – 472с.

77. Хансен Э. Глобальная оптимизация с помощью методов интервального анализа /Э. Хансен, Дж. В. Уолстер// М. Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, Институт компьютерных исследований, –2012. – 516 с.

78. Цветков А.Ф. Методы расчета допусков в радиоэлектронной аппаратуре /А.Ф.Цветков// Рязань: РРТИ, –1970. – 131с.

79. Цыпкин Я.З. Информационная теория идентификации /Я.З.Цыпкин// М.: Наука,– 1995. – 336 с.

80. Цыпкин. Я. З. Теоретические и прикладные задачи оптимизации /Я.З. Цыпкин// М. : Наука, –1985. – С. 179.

81. Черноушко Ф. Л. Оптимальные гарантированные оценки неопределенностей с помощью эллипсоидов /Ф.Л. Черноушко// Изв. АН СССР. Техн. киберн. – 1980. –197 №3. – С. 3–11.

82. Черноушко Ф. Л. Оценивание фазового состояния динамических систем. Метод эллипсоидов /Ф. Л. Черноушко// М. : Наука,–1988. – 320 с.

83. Чернышов В.Н. Теория систем и системный анализ: учебн.пособие /В.Н.Чернышов, А.В.Чернышов// Изд-во Тамб.гос.техн.ун-та, – Тамбов. – 2008. – 96с.
84. Шарый С. П. Алгебраический подход во «внешней задаче» для интервальных линейных систем /С.П.Шарый// Вычислительные Технологии. – 1998. – Т. 3, №2. –С. 67–114.
85. Шарый С. П. Алгебраический подход к анализу линейных статических систем с интервальной неопределённостью /С.П.Шарый// Известия РАН. Теория и системы управл. – 1997. – №3. – С. 51–61.
86. Шарый С. П. Анализ чувствительности интервальных линейных статических систем /С.П.Шарый// Труды XI международной Байкальской школы–семинара «Методы оптимизации и их приложения», Иркутск, Байкал, 5–12 июля 1998 г., секция 4. – Иркутск ИСЭМ, –1998. – С. 187–190.
87. Шарый С. П. Внешнее оценивание обобщенных множеств решений интервальных линейных систем /С.П.Шарый// Вычислительные Технологии. – 1999. – Т. 4, №4. – С. 82–110.
88. Шарый С. П. Интервальные алгебраические задачи и их численное решение : Дис. доктора физ. –математ. наук /С. П. Шарый// Новосибирск :Ин–т вычисл. Технологий СО РАН,– 2000. – 322 с.
89. Шарый С. П. Линейные статические системы с интервальной неопределенностью: эффективные алгоритмы для решения задач управления и стабилизации /С. П. Шарый// Красноярск, –1994. – 13 с.
90. Шарый С. П. Новый подход к анализу статических систем с интервальной определённостью в данных /С.П.Шарый// Вычислительные Технологии. – 1997. –Т. 2 –№1. – С. 84–102.
91. Шарый С. П. О разрешимости линейной задачи о допусках /С.П.Шарый// Interval Computations.– 1991. – №1. – С. 92–97.
92. Шарый С. П. О разрешимости линейной задачи о допусках /С.П.Шарый// IntervalComputations.– 1991. – №1. –С. 92-97.

93. Шарый С.П. Конечномерный интервальный анализ /С.П.Шарый// Новосибирск, Институт вычислительных технологий СО РАН,–2009. –569 с.
94. Ямпурин Н.П. Основы надежности электронных средств: учебное пособие для студентов высших учебных заведений /Н.П.Ямпурин, А.В.Баранова// М.: Издательский Центр «Академия», – 2010. – 240с.
95. Bobalo Yu. Analysis of quality of radio electronic devices in multistage production systems /Yu.Bobalo, M.Kiselychnyk, L.Nedostup// Przegląd Elektrotechniczny, –2010. – nr 1. –P.124-127.
96. Bobalo Yu. Estimation of functional usability of radio electronic circuits by applying method of confidence ellipsoids /Yu.Bobalo, P.Stakhiv, S.Krepych // Computational Problems of Electrical Engineering: Lviv Polytechnic National University. –2012, –Vol. 2,No.2. – P.1-7.
97. Bobalo Yu. Evaluation of functional device suitability, with considering of random technological deviations of the parameters from the nominal and process of component aging / Yu.Bobalo, P.Stakhiv, S.Krepych, M.Dyvak// Przegląd Elektrotechniczny: Warszawa, Poland. – 2014. – Vol.2014.Nr4.– P.224-228.
98. Dyvak M. Features of identification of interval differential operator /M. Dyvak, I. Voytyuk, I. Spivak// electronic version of Proceedings of the X-th International Conference TCSET'2010 “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science”, Dedicated to the 165-th Anniversary of Lviv Polytechnic National University. – Lviv-Slavske, Ukraine. – February 23-27, 2010. – Section 6, 2.
99. Foo S.W. Hybrid method of tolerance design /S.W.Foo, Y.Lin// Proceedings of ICECS'99. The 6<sup>th</sup> IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 1999. – 1999. – vol.1 – P.557-560
100. Haupt R.L. Practical genetic algorithm /R.L.Haupt, S.E.Haupt//New Jersey: Willey&Sons Inc., –1998.
101. Krepych S. Analysis of the tolerance area parameters REC based on technological area scattering /S.Krepych, P.Stakhiv, I.Spivak// 12-th 12-th

International Conference “The Experience Of Designing And Application Of CAD Systems in Microelectronics” Polyana Svalyava (Zakarpattya) UKRAINE 19-23 February, – 2013. – P.179-180.

102. Krepych S. The task of synthesis of analog filter with the specified admissible values of the output characteristics and computing complexity of the methods of theis solution /S.Krepych, M.Dyvak, P.Stakhiv, R.Shevchuk//13-th International Conference “The Experience Of Designing And Application Of CAD Systems in Microelectronics” Polyana Svalyava (Zakarpattya) UKRAINE 24-27 February, – 2015. – P.119-121.

103. Krepych S.Comparative analysis of the Monte-Carlo method and the confidence ellipsoids for solving task of REC reliability evaluation /S.Krepych, M.Dyvak, P.Stakhiv//IV International Conference on Inductive Modelling, ICIM’2013, Kyiv UKRAINE, 16-20 September, – 2013. – P.167-171.

104. Kumkov S. Interval approach to identification of parameters of experimental process model /S.Kumkov, Yu.Mikushina// 15<sup>th</sup> GAMM-IMACS International Symposium on Scientific Computing, Computer Arithmetics and Verified Numerics. – 2012.–P. 90-93.

105. Milanese M. Bounded approaches to system identification /M.Milanese, J.Norton, H.Piet–Lahanier, E.Walter// New–York, London : Plenum Press,– 1996. – 357 p.

106. Ozev S. Boosting the accuracy of analog test coverage computation through statistical tolerance analysis/S.Ozev, A.Orailoglu// VLSI Test Symposium, – 2002. – P. 213-219.

107. Ozev S. Boosting the accuracy of analog test coverage computation through statistical tolerance analysis /S.Ozev, A.Orailoglu// VLSI Test Symposium, – 2002.– P.213-219.

108. Schweppe F. C. Recursive state estimation: unknown but bounded error and system inputs /F.C.Schweppe // IEEE Trans. Automat. Control. – 1968. – AC–13. – № 1. – P. 22–28.

109. Shary S. Randomized interval methods for global optimization / Sergey Shary, Nikita Panov /S.Shary// 15<sup>th</sup> GAMM-IMACS International Symposium on Scientific Computing, Computer Arithmetics and Verified Numerics. – 2012. –P. 168-170.
110. Spence R. Tolerance Design of Electronic Circuits /R.Spence, R.S.Soin.Addison// Wesley Publ.Co., –1988.
111. Stakhiv P. Evaluation of functional suitability of the filter by the method of confidence ellipsoids /P.Stakhiv, M.Dyvak, S.Krepych//12-th Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunication, And Computer Science Lviv-Slavske, UKRAINE, –2014. – P. 395-397.
112. Stakhiv P. Evaluation of the functional suitability of the device considering the technological parameters of random deviations from the nominal component aging processes /P.Stakhiv, Yu.Bobalo, S.Krepych// Computational Problems of Electrical Engineering and Advanced Methods of the Theory of Electrical Engineering, CPEE-AMTEE'13. – Roztoky,Czech Republic,4-6 September 2013. – P.34.
113. Walter E. Identification of parametric model from experimental data /E. Walter, L. Pronzato// London, Berlin, Heidelberg, New York, Paris, Tokyo: Springer, –1997. – 413 p.
114. АСОНИКА [Електронны ресурс]. – Режим доступа URL: <http://asonika-online.ru/>
115. Гипсокартон, гипсокартон Кнауф (Knauf) [Електронний ресурс]. – Режим доступа URL : [http://www.solkimar.com/partition\\_gk.html](http://www.solkimar.com/partition_gk.html)
116. Гипсокартонні роботи [Електронний ресурс]. – Режим доступа URL: [http://robotgips.ucoz.ua/index/bezkarkasne\\_oblicjuvannja\\_stin/0-11](http://robotgips.ucoz.ua/index/bezkarkasne_oblicjuvannja_stin/0-11)
117. Довірчий еліпсоїд [Електронний ресурс]. – Режим доступа URL: [http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc\\_mathematics/4688](http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_mathematics/4688)
118. Закони розподілу випадкових величин [Електронний ресурс]. – Режим доступа URL : [http://www.msiu.ru/~belova/compmod/lect1\\_0.pdf](http://www.msiu.ru/~belova/compmod/lect1_0.pdf)
119. Лінія виробництва гіпсокартонних листів [Електронний ресурс].

– Режим доступа URL: <http://msd.in.ua/lin-proizv-gips-karton/>

120. Надійність електронних апаратів [Електронний ресурс]. – Режим доступа URL: <http://www.bestreferat.ru/referat-214714.html>

121. Обзор методов безусловной оптимизации [Електронний ресурс]. – Режим доступа URL: <http://www.sbras.ru/rus/textbooks>

122. Програма схемотехнического моделирования Micro-Cap 9.0 [Електронны ресурс]. – Режим доступа URL: <http://mega-avr.com.ua>

123. Старіння технічних пристроїв [Електронний ресурс]. – Режим доступа URL: <http://uadoc.zavantag.com/text/3533/index-1.html?page=6>

124. Теорія надійності [Електронний ресурс]. – Режим доступа URL: <http://reliability-theory.ru/topics/t7r1part1.html>

125. Теория систем и системный анализ [Електронний ресурс]. – Режим доступа URL: <http://victor-safronov.ru/systems-analysis>

126. Технологія виготовлення гіпсокартону [Електронний ресурс]. – Режим доступа URL: <http://asyan.org/potra>

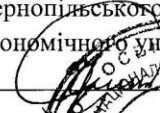
127. Matlab & Toolboxes [Електронний ресурс]. – Режим доступа URL: <http://matlab.exponenta.ru/statist/book2/5/mvnrnd.php>

## ДОДАТОК А

Довідки про використання дисертаційного дослідження



ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор  
Тернопільського національного  
економічного університету  
« Шчепанук М. І.  
2015 р.



## АКТ

про впровадження в навчальний процес Тернопільського національного економічного університету результатів дисертаційної роботи

Крепич Світлани Ярославівни

**«Моделювання та забезпечення функціональної придатності статичних систем методами аналізу інтервальних даних»**

Даний акт складений про те, що результати дисертаційної роботи аспірантки кафедри комп'ютерних наук Крепич Світлани Ярославівни на тему «Моделювання та забезпечення функціональної придатності статичних систем методами аналізу інтервальних даних», використані в навчальному процесі факультету комп'ютерних інформаційних технологій Тернопільського національного економічного університету для студентів спеціальності «Інженерія програмного забезпечення», зокрема при викладанні дисциплін «Теорія надійності програмних систем» та «Інтервальні обчислення та інтервальний аналіз»:

- надається інформація про метод допускового еліпсоїдного оцінювання функціональної придатності статичних систем з врахуванням часової зміни параметрів компонент;
- використовується в процесі виконання комплексного практичного індивідуального завдання метод та алгоритм розв'язування інтервальної системи нелінійних алгебричних рівнянь, який, на відміну від існуючих, ґрунтується на процедурі випадкового пошуку з використанням «направляючого конуса Растрігіна» і забезпечує знаходження множини розв'язків цієї системи.

Декан факультету комп'ютерних  
інформаційних технологій,  
д.т.н., професор

М. П. Дивак

В. о. завідувача кафедри комп'ютерних наук  
к.т.н, доцент

А. В. Пукас

К.т.н., доцент кафедри комп'ютерних наук

М. Я. Шпінталь

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи  
Тернопільського національного  
економічного університету

д.с.н., проф. З.-М. В. Задорожний

2015 р.

АКТ

про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи  
Крепич Світлани Ярославівни**«Моделювання та забезпечення функціональної придатності статичних систем  
методами аналізу інтервальних даних»**

Комісія у складі голови – декана факультету комп'ютерних інформаційних технологій, керівника науково-дослідної роботи, д.т.н., проф. Дивака М.П. та членів: завідувача відділом організації науково-дослідних робіт та маркетингу Письменного В.І., начальника відділу прогнозування і маркетингу Кушніра О. Р. склали цей акт про те, що дослідження та результати дисертаційної роботи Крепич С.Я. використані під час виконання науково-дослідних робіт на кафедрі комп'ютерних наук з безпосередньою участю автора, а саме:

- держбюджетної прикладної розробки на тему «Інформаційна технологія для ідентифікації і візуалізації зворотного гортанного нерва в процесі хірургічної операції на щитовидній залозі (номер державної реєстрації 0112U000078), у якій автором розроблено метод допускового еліпсоїдного оцінювання функціональної придатності пристрою з врахуванням часової зміни параметрів компонент в процесі експлуатації;
- держбюджетного прикладного дослідження на тему «Теорія побудови та методи реалізації в реальному часі міждисциплінарних математичних моделей зміни стану складних об'єктів» (номер державної реєстрації 0114U000569), у якій автором розроблено метод обчислення параметрів статичних систем на основі допускового оцінювання, який ґрунтується на розв'язуванні інтервальної системи нелінійних алгебричних рівнянь з урахуванням допусків на параметри та обмежень на вихідні характеристики системи;
- науково-дослідної роботи на тему «Макромодельовання складних систем та процесів в умовах структурної невизначеності на основі неточних даних» (номер державної реєстрації 0111U010356), у якій автором розроблено програмний комплекс для моделювання та забезпечення функціональної придатності статичних систем;
- госпдоговірної науково-дослідної роботи на тему «Розподілена система контролю технологічного процесу виробництва гіпсокартону» (номер державної реєстрації 0112U003917), у якій автором розроблено метод моделювання та забезпечення функціональної придатності технологічного обладнання лінії по виготовленню гіпсокартону в умовах змінних характеристик сировини.

**Голова комісії**

декан ФКІТ, керівник НДР, д.т.н., проф.

**Члени комісії:**Зав. відділом організації науково-дослідних  
робіт та маркетингу НДІ ІРД

Начальника відділу

прогнозування і маркетингу

Дивак М.П.

Письменний В.І.

Кушнір О. Р.



### АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи  
**Крепич Світлани Ярославівни**  
 “Моделювання та забезпечення функціональної придатності статичних систем методами  
 аналізу інтервальних даних”

Даний акт складений про те, що при проектуванні та виробництві радіоелектронної апаратури використано такі результати дисертаційної роботи аспірантки кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету Крепич Світлани Ярославівни:

1. Метод допускового еліпсоїдного оцінювання функціональної придатності пристрою з врахуванням процесів старіння компонент електричних кіл на основі аналізу інтервальних даних;

2. Інструментальні засоби у вигляді методів та програмного комплексу їх реалізації для моделювання та забезпечення функціональної придатності електричних кіл на основі аналізу інтервальних даних.

Перераховані результати дали змогу підвищити функціональну придатність електричних кіл та визначення допусків на параметри їх компонент.

Головний інженер

С.О.Піскун

“ЗАТВЕРДЖУЮ”  
Директор ІПІ “Українські гіпсокартонні системи”

  
Рибачук В. І.  
2015 р.



### АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи  
**Крепич Світлани Ярославівни**  
“Моделювання та забезпечення функціональної придатності статичних систем методами аналізу інтервальних даних”

Ми, комісія у складі: Манжула Валентин Іванович, Войтків Ігор Олександрович, склали даний акт про те, що при організації технологічного процесу виробництва гіпсокартону та забезпеченні функціональної придатності обладнання конвеєрної лінії використано такі результати дисертаційної роботи аспірантки кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету Крепич Світлани Ярославівни:

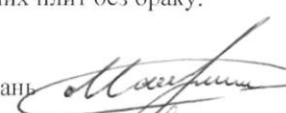
1. Метод обчислення параметрів статичних систем на основі допускового оцінювання, який забезпечує отримання оптимального вектора параметрів системи з їх допусками при заданій функціональній придатності.

2. Метод моделювання та забезпечення функціональної придатності технологічного обладнання лінії по виробництву гіпсокартону.

3. Інтервальна модель характеристики гіпсового осердя гіпсокартону, яка визначається часом його затвердіння в залежності від характеристик гіпсу та інших складників.

4. Програмний комплекс для моделювання та забезпечення функціональної придатності статичних систем на основі аналізу інтервальних даних. Застосування комплексу дало можливість отримати номінальні значення та допуски на параметри технологічного обладнання і характеристики складників для виготовлення гіпсокартону. Отримані номінальні значення та допуски забезпечують функціональну придатність лінії по виробництву гіпсокартону і дозволяють усунути додаткове експериментальне налаштування технологічного обладнання.

Розроблені методи, програмний комплекс та математичні моделі дають можливість вдвічі зменшити час налаштування технологічної лінії по виробництву гіпсокартону і забезпечують виробництво гіпсокартонних плит без браку.

Заступник директора з виробничих питань  Манжула В. І.

Начальник відділу технічного контролю  Войтків І. О.

ДОДАТОК Б  
ЛІСТИНГ ПРОГРАМНОГО КОДУ

```
namespace MonteKarloMethod
{
    public partial class MainForm : Form
    {
        IArray<float> result;
        private bool _wasElipsDrawButtonClick ;
        private Worker _worker;
        public MainForm()
        {
            InitializeComponent();
        }
        private void FormLoad(object sender, EventArgs e)
        {
            var intMode = InteractiveModes.Translating;
            var ratio = AspectRatioMode.MaintainRatios;
            var monteKarlo = ILPanel.Create();
            monteKarlo.InteractiveMode = intMode;
            monteKarlo.AspectRatio =ratio;
            monteKarlo.Name = "MonteKarlo";
            var elipse = ILPanel.Create();
            elipse.InteractiveMode = intMode;
            elipse.AspectRatio = ratio;
            elipse.Name = "Elipse";
            var compare = ILPanel.Create();
            compare.InteractiveMode = intMode;
            compare.AspectRatio = ratio;
            compare.Name = "Comparer";
            splitContainerMontekarlo.Panel2.Controls.Add(monteKarlo);
            splitContainerElipse.Panel2.Controls.Add(elipse);
            splitContainerCompare.Panel2.Controls.Add(compare);
            //PreparePanel();
            cbSize.SelectedIndex = 0;
            //labelP.Text = string.Empty;
        }
    }
}
```

```

private void Draw2D(ILArray<float> data)
{
    var mPanel = GetActiveTabPageIIPanel();
    var lines = mPanel.Graphs.AddLineGraph(data[";0"], data[";1"]);

    lines.ToList().ForEach(v =>
        {
            v.Line.Visible = false;
            v.Marker.Color = Color.Black;
            v.Marker.Shape = MarkerStyle.Diamond;
            v.Marker.Size = 1;
        });
    mPanel.Graphs.AddLineGraph(line1["0;"], line1["1;"]).ToList().ForEach(v=>v.Line.Color =
Color.Blue);
    mPanel.Graphs.AddLineGraph(line2["0;"], line2["1;"]).ToList().ForEach(v => v.Line.Color =
Color.Blue);
    mPanel.Graphs.AddLineGraph(line3["0;"], line3["1;"]).ToList().ForEach(v=>v.Line.Color =
Color.Blue);
    mPanel.Graphs.AddLineGraph(line4["0;"], line4["1;"]).ToList().ForEach(v=>v.Line.Color =
Color.Blue);
    mPanel.Refresh();
}

private void PrepareAndDrawEllipse(double from, double step, double a, double b, double c, double
radius, Color color)
{
    var stopwatch = new Stopwatch();
    ILArray<float> arr = GetEllipsePoints(from, step, a, b, c, radius);
    arr = arr.T;
    var mPanel = GetActiveTabPageIIPanel();
    var lines = mPanel.Graphs.AddLineGraph(arr[";0"], arr[";1"]);
    lines[0].Line.Visible = true;
    lines[0].Line.Color = color;
    lines[0].Line.Width = 5;
    mPanel.Refresh();
}

public float[,] ConvertArrayOfDoubleToFloat(double[,] input)
{
    if (input == null)

```

```

    {
        return null; // Or throw an exception - your choice
    }
    var output = new float[input.GetLength(0), input.GetLength(1)];
    for (int i = 0; i < input.GetLength(0); i++)
    {
        for (var j = 0; j < input.GetLength(1); j++)
            output[i,j] = (float)input[i,j];
    }
    return output;
}
private void PreparePanel()
{
    var splitCont =
tabControl1.SelectedTab.Controls.OfType<SplitContainer>().FirstOrDefault();
    if(splitCont == null) return;
    var mPanel = GetActiveTabPageILPanel();
    if(mPanel.Graphs.Count!=0) mPanel.Graphs.Clear();
    mPanel.Refresh();
    return;
    if(mPanel != null)
    {
        splitCont.Panel2.Controls.Remove(mPanel);
        mPanel.Dispose();
        mPanel = null;
    }
    mPanel = ILPanel.Create();
    mPanel.ZoomMode = ZoomModes.RollSoft;
    splitCont.Panel2.Controls.Add(mPanel);
    mPanel.Refresh();
}
private class Computation : ILMath
{
    public static ILRetArray<int> MakeColors(ILInArray<float> data)
    {
        using (ILScope.Enter(data))
        {
            ILMArray<int> ret = array(125, data.S);

```

```

        return ret;
    }
}
private int GetElementNumberFromCombobox(ComboBox combo = null)
{
    int elementNumber;
    combo = combo ?? GetActiveTabPageCombobox();
    if (combo == null) return -1;

    if (!Int32.TryParse(combo.Text, out elementNumber))
    {
        throw new Exception(
            string.Format("Cannot convert combobox text to int. Combobox text: {0}",
                combo.SelectedText));
    }
    return elementNumber;
}
private void RefreshRunButton()
{
    var elementNumber = GetElementNumberFromCombobox();
    int xPos = 200;
    switch (elementNumber)
    {
        case 2:
            xPos = 200;
            break;
        case 3:
            xPos = 280;
            break;
    }
    var culcButton = GetActiveTabPageButton();
    culcButton.Location = new Point(xPos, culcButton.Location.Y);
}
private void CbSizeSelectedIndexChanged(object sender, EventArgs e)
{
    var elementNumber = GetElementNumberFromCombobox();
    RefreshRunButton();
}

```



```

var drawPanel = GetActiveTabPagePanel();

if(drawPanel == null)return;

int startX = 3, startY = 3;
int height = 20, width = 77;
int xDistance = 6, yDistance = 6;
drawPanel.Controls.Clear();
var elements = new TextBox[elementNumber,elementNumber];

for(var i = 0;i<elementNumber;i++)
{
    for(var j = 0;j<elementNumber;j++)
    {
        var newTextBox = new TextBox
            {
                Name = string.Format("txbA{0}{1}", i + 1, j + 1),
                TabIndex = i*elementNumber + j,
                Size = new Size(width,height),
                Location = new Point(startX + (width + xDistance) * j, startY + (height +
yDistance) * i)
            };
        newTextBox.KeyPress += NewTextBoxKeyPress;
        newTextBox.TextChanged += NewTextBoxTextChanged;
        drawPanel.Controls.Add(newTextBox);
        elements[i, j] = newTextBox;
    }
}

tabControl1.SelectedTab.Tag = elements;
FillElementWithDefaultValues();
ResizeSplitter();
}
private void FillElementWithDefaultValues()
{
    var elementNumber = GetElementNumberFromCombobox();
    TextBox[,] elements;

```

```

        if(tabControl1.SelectedTab.Tag == null || (elements = tabControl1.SelectedTab.Tag as
        TextBox[,]) == null) return;
    }
    void NewTextBoxTextChanged(object sender, EventArgs e)
    {
        var button = GetActiveTabPageButton();
        var panel = GetActiveTabPagePanel();
        if(button == null || panel == null) return;
        button.Enabled = FormHelper.IsChildTextboxesFilled(panel);
    }
    void NewTextBoxKeyPress(object sender, KeyPressEventArgs e)
    {
        FormHelper.ProcessInputText(sender, e, FormHelper.NumberFormat.Double);
    }
    private void CalculateMatrix()
    {
        var elementNumber = GetElementNumberFromCombobox();
        var numberOfPoints = 10000;
        _worker = new Worker(numberOfPoints, _mu2, GetInputSigma());
        try
        {
            var currentCur = Cursor.Current;
            Cursor.Current = Cursors.WaitCursor;
            //var stopwatch = new Stopwatch();
            //stopwatch.Start();

            try
            {
                result = _worker.RunFloat();
            }
            catch (Exception ex)
            {
                MessageBox.Show(string.Format("Error: {0}", ex.Message));
            }
            Cursor.Current = currentCur;
        }
        catch (Exception ex)
        {

```

```

        MessageBox.Show(ex.Message, "Помилка", MessageBoxButtons.OK,
        MessageBoxIcon.Error);
        return;
    }
}
private void DrawMontekarlo(ComboBox combo = null)
{
    var elementNumber = GetElementNumberFromCombobox(combo);
    if(result == null) return;
    switch (elementNumber)
    {
        case 2:
            Draw2D(result);
            break;
    }
}
private void BtnCalculateClick(object sender, EventArgs e)
{
    var btn = sender as Button;
    if(btn == null) return;
    PreparePanel();
    if(btn == btnCalculateMontekarlo)
    {
        CalculateMatrix();
        DrawMontekarlo();
    }
    else if(btn == btnCalculateElips)
    {
        _wasElipsDrawButtonClick = true;
        DrawEllipse();
    }
}
private IArray<float> GetInputSigma()
{
    var elementNumber = GetElementNumberFromCombobox();
    IArray<float> sigma = ILMath.zeros<float>(elementNumber, elementNumber);
    TextBox[,] elements;
    if (tabControl1.SelectedTab.Tag == null || (elements = tabControl1.SelectedTab.Tag as

```

```

TextBox[,]) == null) return null;

    for(var i=0;i<elementNumber;i++)
    {
        for(var j=0;j<elementNumber;j++)
        {
            float elementValue;
            if (!float.TryParse(elements[i, j].Text.Replace(",", "."), NumberStyles.Any, new
CultureInfo("en-US"), out elementValue)) throw new Exception("Cannot convert values to float");
            sigma.SetValue(elementValue,i,j);
        }
    }
    return sigma;
}

private void MainFormResize(object sender, EventArgs e)
{
    ResizeSplitter();
}

private void ResizeSplitter()
{
    var splicCont = tabControl1.SelectedTab.Controls.OfType<SplitContainer>().FirstOrDefault();
    TextBox[,] elements;
    if (tabControl1.SelectedTab.Tag == null || (elements = tabControl1.SelectedTab.Tag as
TextBox[,]) == null ||
        splicCont == null) return;
    var lastElement = elements[elements.GetLength(0) - 1, elements.GetLength(1) - 1];
    splicCont.SplitterDistance = lastElement.Location.Y + panel1.Location.Y +
lastElement.Size.Height + 10;
}

private string PrintArrayToString<T>(ILArray<T> array)
{
    var str = new StringBuilder();

    for (var i = 0; i < array.Size[0]; i++)
    {
        for (var j = 0; j < array.Size[1]; j++)
        {
            str.AppendFormat("{0}\t", array.GetValue(i,j));

```

```

    }
    str.Length = str.Length - "\t".Length;
    str.AppendLine();
}
return str.ToString();
} private void TabControl1_SelectedIndexChanged(object sender, EventArgs e)
{
    var combo = GetActiveTabPageCombobox();

    if (combo == null)
    {
        PreparePanel();
        DrawMontekarlo(cbSize);
        if(!_wasElipsDrawButtonClick)
            DrawEllipse();
        if (_wasElipsDrawButtonClick && _worker != null && _worker.R != default(float))
            return;
    }
    if( combo == null || combo.SelectedIndex!=-1) return;
    combo.SelectedIndex = 0;
}
private ComboBox GetActiveTabPageCombobox()
{
    var splitCont = tabControl1.SelectedTab.Controls.OfType<SplitContainer>().FirstOrDefault();
    return splitCont == null ? null :
splitCont.Panel1.Controls.OfType<ComboBox>().FirstOrDefault();
}
private Button GetActiveTabPageButton()
{
    var splitCont = tabControl1.SelectedTab.Controls.OfType<SplitContainer>().FirstOrDefault();
    return splitCont == null ? null : splitCont.Panel1.Controls.OfType<Button>().FirstOrDefault();
}
private Panel GetActiveTabPagePanel()
{
    var splitCont = tabControl1.SelectedTab.Controls.OfType<SplitContainer>().FirstOrDefault();
    return splitCont == null ? null : splitCont.Panel1.Controls.OfType<Panel>().FirstOrDefault();
}
private ILPanel GetActiveTabPageILPanel(TabPage tb = null)

```

```
{
    var tabPage = tb ?? tabControl1.SelectedTab;
    var splitCont = tabPage.Controls.OfType<SplitContainer>().FirstOrDefault();
    return splitCont == null ? null : splitCont.Panel2.Controls.OfType<ILPanel>().FirstOrDefault();
}
private void ExitMenuClick(object sender, EventArgs e)
{
    Application.Exit();
}
private void ChangeLanguageToUkraine(object sender, EventArgs e)
{
    FormHelper.SetLanguage(this, new CultureInfo("uk-UA"));
}
private void ChangeLanguageToEnglish(object sender, EventArgs e)
{
    FormHelper.SetLanguage(this, new CultureInfo("en-US"));
}
}}
```