

**Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Тернопільський національний економічний університет  
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій  
Кафедра комп'ютерної інженерії**

До захисту допущено  
Завідувач кафедри  
комп'ютерної інженерії  
к.т.н., доц. О.М.Березький

\_\_\_\_\_ р.  
" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 20\_\_

**ДИПЛОМНА РОБОТА**  
освітньо-кваліфікаційного рівня "Магістр"  
зі спеціальності 8.05010201 "Комп'ютерні системи та мережі"  
на тему:

**МЕТОДИ ОЦІНКИ ЕНТРОПІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ  
ПОТОКІВ В КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ**

Студент групи КСМзм - 51  
Спиридонов Б.Ф.

\_\_\_\_\_ підпис

Науковий керівник  
д.т.н., професор Николайчук Я.М.

\_\_\_\_\_ підпис

Консультант з нормоконтролю  
Березький О. В.

\_\_\_\_\_ Прізвище, ініціали

\_\_\_\_\_ Підпис

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Тернопільський національний економічний університет  
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій  
Кафедра комп'ютерної інженерії

“Затверджую”  
Зав. кафедри  
комп'ютерної інженерії  
к.т.н., доц. О.М. Березький

---

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## ЗАВДАННЯ

### НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТА

**Спиридонова Богдана Федоровича**

1. **Тема дипломної роботи** “Методи оцінки ентропії інформаційних потоків в комп'ютерних мережах” затверджена наказом університету № 475 від 14 жовтня 2011 року.

2. **Термін здачі** закінченої дипломної роботи \_\_\_\_\_

3. **Об'єкт дослідження:** процеси формування та ентропійного опрацювання інформаційних повідомлень в комп'ютерних мережах..

4. **Предмет дослідження:** Методи та засоби опрацювання інформації на основі ентропійно-кореляційних моделей та спецпроцесорів.

5. **Перелік задач, які мають бути вирішені:**

- провести аналіз теоретичних методів опрацювання інформаційних потоків в комп'ютерних мережах та дослідити перспективи застосування ентропійного аналізу для моделювання джерел інформації;
- виконати порівняння характеристик інформаційних мір ентропії для ДІ з різними статистичними та кореляційними характеристиками;
- дослідити ентропійні характеристики сукупності сигнальних, статистичних та кореляційних моделей джерел інформації;
- розробити ентропійно-кореляційні моделі квазістаціонарних джерел інформації;
- розробити структурні та принципові рішення спецпроцесорів діагностування станів складних квазістаціонарних технологічних об'єктів.

6. **Перелік ілюстративного матеріалу:**

- асимптотика аналітично заданих сигналів;
- ентропія аналітично заданих сигналів;
- реалізації стаціонарного та квазістаціонарного джерела інформації;
- реалізація ентропійних станів джерел інформації;
- асимптотика інформаційної міри ентропії;
- автокореляційні функції характеристик промислового виробництва;
- графік квазістаціонарних станів технологічних показників цукрового виробництва;
- структура процесорів визначення ентропії для різних кореляційних функцій.

7. **Консультанти** по роботі

Розділ	Консультант	Підпис
1		
2		
3		

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва структурних частин ДР	Термін виконання	Примітка
1	Методи та засоби формування ентропійних характеристик джерел інформації	15.09.2011 – 5.11.2011	
2	Дослідження оцінок ентропійних та кореляційних характеристик джерел інформації	6.11.2011 – 31.01.2012	
3	Побудова ентропійної моделі квазістаціонарного джерела інформації	1.02.2012 – 23.04.2012	

**Завдання прийняв до виконання** \_\_\_\_\_  
(підпис)

**Керівник дипломної роботи** \_\_\_\_\_  
(підпис)

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота на тему “Методи оцінки ентропії інформаційних потоків в комп’ютерних мережах” на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня “Магістр” зі спеціальності “Комп’ютерні системи та мережі” написана обсягом 81 сторінки і містить 33 ілюстрації, 17 таблиць, 2 додатки та 28 джерел за переліком посилань.

**Метою роботи** є розроблення методів оцінки ентропії інформаційних потоків у комп’ютерних мережах та побудова відповідних спецпроцесорів.

**Методи досліджень** базуються на методах теорії інформації, теорії алгоритмів, теорії цифрових автоматів, теорії ймовірності та випадкових процесів, статистичного та кореляційного опрацювання даних, принципах математичного моделювання та теорії джерел інформації.

Запропоновано новий метод формування характеристик складних джерел інформації на основі ентропійного підходу, який забезпечує підвищення рівня інтегрованості подання ймовірно-статистичних параметрів джерел інформації. Розроблено ентропійно-кореляційні моделі квазістаціонарних джерел інформації. Отримали подальший розвиток теоретичні засади формування ентропійно-кореляційних моделей для аналітично заданих сигналів.

Результати роботи можуть бути використані при прогнозуванні аварійних та передаварійних станів на об’єктах промислового виробництва.

Можливими напрямками подальших досліджень є продовження робіт по розробленню та дослідженні ентропії інформаційних потоків.

**Ключові слова:** ЕНТРОПІЯ, ІНФОРМАЦІЙНІ ПОТОКИ, КОМП’ЮТЕРНІ МЕРЕЖІ, ІНФОРМАЦІЯ, СПЕЦПРОЦЕСОР.

## ABSTRACT

The diploma work on theme " Methods for evaluating the entropy of information flow in computer networks" on education and qualification of "Master" specialty "Computer systems and networks" written up 81 pages and contains 33 figures, 17 tables, 2 applications and 28 sources for references.

**The aim of work** is to develop methods for estimation of entropy of information flow in computer networks and the construction of the relevant special processors.

**The methods of research** based on the methods of information theory, theory of algorithms, the theory of digital automata, probability theory and stochastic processes, statistical and correlation of data processing, principles of mathematical modeling and theory of sources of information.

A new method of forming characteristics of complex sources based entropic approach that provides increased integration presentation and statistical parameters are likely sources of information. A Entropy-correlation model of quasi-stationary sources. Were further developed theoretical base of Entropy-correlation models for analytically specified signal.

The results may be used in predicting emergency and a critical condition for industrial production.

Possible directions for further research is continuing work on the development and study of the entropy of information flows.

**Keywords:** ENTROPY, INFORMATION FLOWS, COMPUTER NETWORKS, INFORMATION, SPECIAL PROCESSORS.

## ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Методи та засоби формування ентропійних характеристик джерел інформації .....	10
1.1 Класифікація моделей джерел інформації та об'єктів управління .....	10
1.2 Ентропійні моделі джерел інформації .....	12
1.3 Методи визначення ентропії джерел інформації .....	20
1.4 Кореляційні моделі, які використовуються для розрахунку ентропії.....	24
Висновки до розділу 1.....	29
2 Дослідження оцінок ентропійних та кореляційних характеристик джерел інформації .....	30
2.1 Теоретичні основи оцінки ентропії .....	30
2.2 Кореляційні характеристики шумоподібних сигналів .....	35
2.3 Ентропійні характеристики двовимірних та одновимірних шумоподібних сигналів.....	37
2.4 Дослідження ентропійних характеристик аналітично заданих сигналів.....	40
Висновки до розділу 2.....	54
3 Побудова ентропійної моделі квазістаціонарного джерела інформації.....	55
3.1 Характеристики квазістаціонарних джерел інформації .....	55
3.2 Дослідження швидкості створення повідомлення розподіленої комп'ютерної системи .....	58
3.3 Експериментальні дослідження кореляційних та ентропійних характеристик на прикладі цукрового виробництва .....	63
3.4 Розробка структури та дослідження системних характеристик спецпроцесорів визначення міри ентропії на основі різних кореляційних функцій.....	68
Висновки до розділу 3.....	76

Висновки.....	77
Список використаних джерел.....	78
Додаток А. Довідка про впровадження.....	81

## ВСТУП

**Актуальність теми.** При створенні розподілених комп'ютерних систем реального часу (РКС) найбільш складні інформаційні завдання виникають при організації діалогу людина – комп'ютерна система (КС), об'єкт управління - КС, дані – системи передавання даних (СПД), дані – КС [1]. Серед таких завдань одним з перших, які повинні вирішуватись при проектуванні і виборі необхідної потужності технічних засобів РКС, є оцінка параметрів і структури інформаційних потоків, що формуються джерелами інформації (ДІ) [2].

Ці завдання вирішується шляхом розрахунку ентропії ДІ і визначення їх властивостей на основі аналізу інформаційних станів. Визначення ентропії ДІ дозволяє оцінити надмірність інформаційних потоків і призначити оптимальні процедури відбору інформації та її ефективного кодування [3].

Актуальною задачею є правильний відбір інформаційної міри для розрахунку ентропії та побудови відповідної ентропійної моделі, яка б адекватно відображала системні характеристики ДІ, до яких належать: математичне сподівання; дисперсія та середньоквадратичне відхилення; автокореляційні, взаємкореляційні та спектральні властивості.

Оцінка ентропії ДІ є найбільш інтегрованою характеристикою станів об'єкта управління (ОУ) в часі, що може бути ефективно застосовано при аналізі та оптимізації технологічних процесів, передбачення та виявлення передаварійних та аварійних ситуацій, інтерполяції та екстраполяції станів ОУ в часі [4]. Значний вклад в розвиток моделювання ентропійних характеристик внесли такі вітчизняні та зарубіжні вчені: Р.Хартлі, К.Шеннон, М.Колмогоров, В.Боюн, Я.Николайчук, А.Сегін, І.Пітух, Н.Возна та інші.

Важливим інформаційним класом об'єктів управління(ОУ) є квазістаціонарні ОУ. Даний тип об'єктів на різних інтервалах часу може бути представлений різними типами сигналів. При цьому в залежності від характеристик сигналів можуть значно змінюватися ентропійні властивості ОУ, які розглядаються як джерела інформації (ДІ) для комп'ютерних систем, які виконують діагностику, контроль відхилень від норми та ін [5].



При цьому інформаційна міра ентропії на основі автокореляційних характеристик є найбільш інтегральною оцінкою, яка враховує не тільки ймовірності станів ОУ, але й відповідає ймовірності їх переходу з одного стану в інший. Тому дослідження ентропійних властивостей різних аналітично заданих сигналів є актуальною науковою задачею, яку доцільно вирішувати на основі вказаної оцінки ентропії.

На сучасному етапі швидкого розвитку інформаційних технологій та наявності потужної комп'ютерної техніки, а також комп'ютерних телекомунікаційних мереж, ентропійний підхід до аналізу технологічних ОУ стає досить потужним інструментом розвитку та широкомасштабного впровадження програмно-апаратних засобів у РКС для дослідження ентропійних властивостей. При цьому важливим фактором є максимальна адаптація та проблемно-орієнтована реалізація засобів РКС для визначених, конкретних галузей промисловості, технологічних процесів та спеціалізованих ДІ [6, 7]. Все вищесказане і визначає актуальність даної роботи.

**Мета роботи.** Метою даної роботи є розроблення методів оцінки ентропії інформаційних потоків у комп'ютерних мережах та побудова відповідних спецпроцесорів.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні **завдання**:

- провести аналіз теоретичних засад, методів, відомих підходів до формування та опрацювання інформаційних потоків в низових рівнях РКС та дослідити перспективи застосування інформаційних мір ентропії для моделювання ДІ;
- виконати порівняння характеристик інформаційних мір ентропії для ДІ з різними статистичними та кореляційними характеристиками;
- дослідити ентропійні характеристики сукупності сигнальних, статистичних та кореляційних моделей джерел інформації;
- розробити ентропійно-кореляційні моделі квазістаціонарних джерел інформації;
- розробити структурні та принципові рішення спецпроцесорів діагностування станів складних квазістаціонарних технологічних об'єктів.

**Об'єкт дослідження.** Процеси формування та ентропійного опрацювання інформаційних повідомлень в комп'ютерних мережах.

**Предмет дослідження.** Методи та засоби опрацювання інформації на основі ентропійно-кореляційних моделей та спецпроцесорів.

**Методи дослідження.** Методи теорії інформації, теорії алгоритмів, теорії цифрових автоматів, теорії ймовірності та випадкових процесів, методи статистичного та кореляційного опрацювання даних, принципи математичного моделювання та теорії джерел інформації.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Запропоновано новий метод формування характеристик складних джерел інформації на основі ентропійного підходу, який забезпечує підвищення рівня інтегрованості подання ймовірно-статистичних параметрів джерел інформації, що дозволило зменшити об'єм інформаційних потоків на низових рівнях комп'ютерних систем, а також підвищити їх інформативність;

2. Розроблено ентропійно-кореляційні моделі квазістаціонарних джерел інформації, що дозволило підвищити компактність інтегрованого кодування та подання інформаційних моделей джерел інформації на низових рівнях РКС, а також підвищити ефективність їх використання у системах реального часу;

3. Отримали подальший розвиток теоретичні засади формування ентропійно-кореляційних моделей для аналітично заданих сигналів, що дозволило підвищити характеристики ідентифікації та швидкодії виявлення процесів деградації джерел інформації у передаварійних та аварійних станах.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Запропоновані структурні та принципові рішення спецпроцесорів ентропійно-кореляційного опрацювання інформації. Розроблені та реалізовані апаратні засоби опрацювання інформаційних потоків низового рівня РКС для цукрового виробництва.

# 1 МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ФОРМУВАННЯ ЕНТРОПІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

## 1.1 Класифікація моделей джерел інформації та об'єктів управління

Здійснити класифікацію інформаційних моделей можна за багатьма ознаками. Наприклад, за типом задачі, що вирішується, за типом вхідних і вихідних сигналів, за математичним апаратом, що використовується, за кількістю вхідних і вихідних каналів, за поведінкою моделі в часі, за типом інформації, яку модель надає про об'єкт керування (рисунок 1.1) та іншими.

При здійсненні класифікації за типом задачі можна виділити велику кількість груп моделей, оскільки моделі застосовуються в багатьох галузях для вирішення найрізноманітніших задач [2].

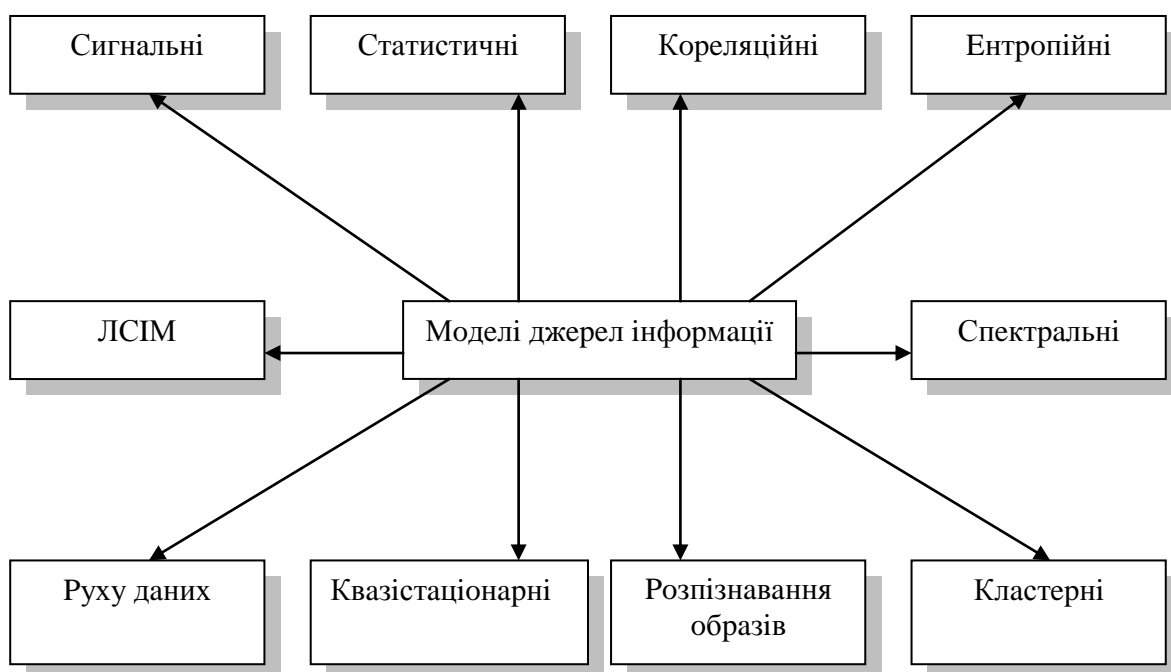


Рисунок 1.1 - Класифікація моделей джерел інформації.

За типом математичного апарату моделі поділяють на два основні класи: детерміновані і статистичні, які, в свою чергу, можна розбити на підкласи, в залежності від математичних методів, які застосовуються в моделях теорії ДІ.

В залежності від кількості вхідних і вихідних каналів моделі ДІ вирізняють чотири класи:

- одноканальні двохрівневі;
- багатоканальні двохрівневі;
- одноканальні багаторівневі;
- багатоканальні багаторівневі.

Залежно від динаміки зміни інформаційних станів ДІ класифікують на 4 типи: детерміновані, стаціонарні, квазістаціонарні та нестаціонарні класи ІМ.

Класифікація ДІ, приведена на рисунку 1.1, здійснена з інформаційних позицій [2]. В поданій класифікації за ознаки вибрано тип інформації, що надається моделлю.

Для розробки моделі відбираються властивості і відношення в об'єкті, які є суттєвими для вирішення поставленої задачі. В результаті відбору отримаємо деякий спрощений образ об'єкту, при цьому важливе значення має те, наскільки правильно, з точки зору вирішуваної задачі, відібрані властивості і відношення реального об'єкту. Потім створюється абстрактна система, яка відповідає першому принципу і, власне, є моделлю. Абстрактна система, переважно, формалізується за допомогою математичного апарату або сукупності правил.

В цілому, процес моделювання проходить три етапи [8]: формування спрощеного образу; введення додаткових умов і спрощень для побудови самої моделі; вибір математичної схеми, яка найбільш адекватна об'єкту і відповідає вирішуваній задачі. Тут під адекватністю розуміється відносна адекватність, що відповідає вирішенню поставленої задачі.

Дана класифікація дозволяє визначити систему класів моделей ОУ. В той же час усі моделі будуються в конвейєрному режимі. Структура зв'язків між ними показана на рисунку 12. Як видно з нього, ентропійні моделі, що базуються на кореляційних та статистичних властивостях, можуть бути ефективно використані для вирішення задач та реалізації моделей розпізнавання образів. В ряді робіт [6, 7] показані приклади та перспектива їх ефективного застосування для виявлення передаварійних ситуацій та дослідження квазістаціонарних об'єктів.

Всі біт-орієнтовані інформаційні потоки телекомунікаційних систем та комп'ютерних мереж можна віднести до джерел інформації першого класу.

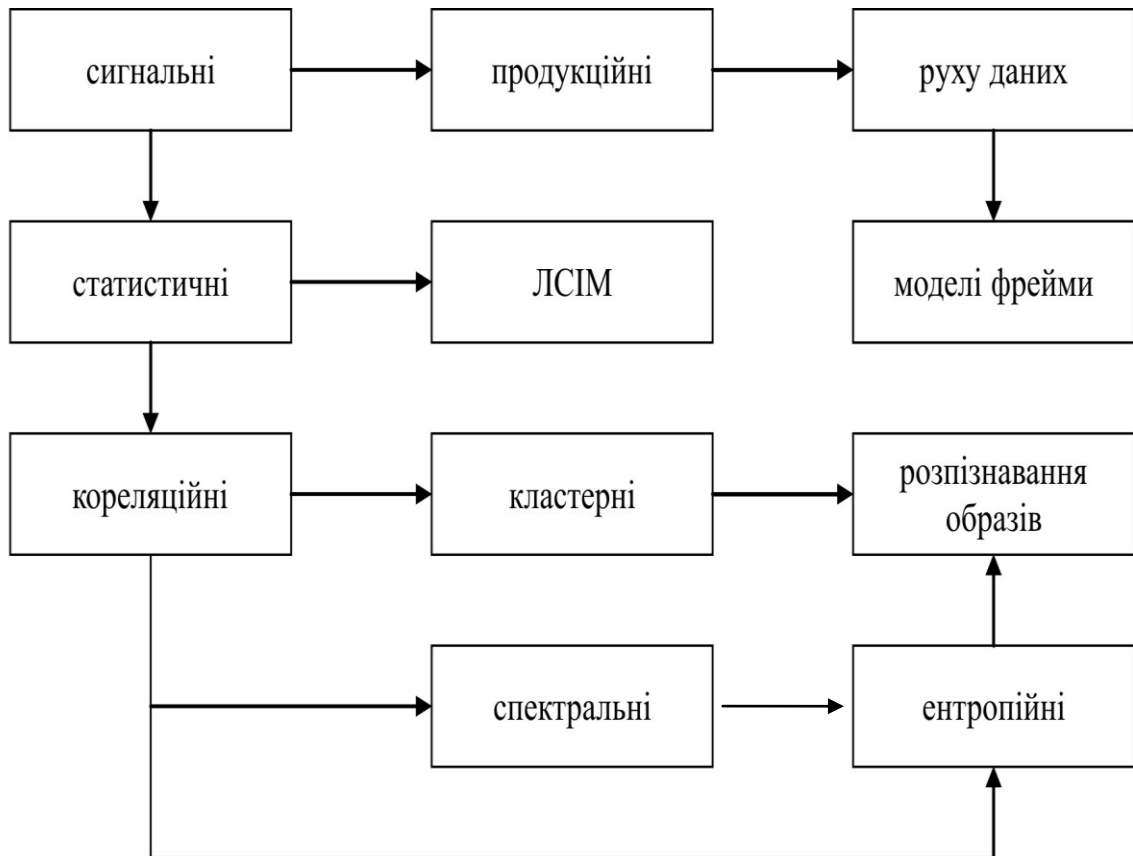


Рисунок 1.2 - Зв'язок між характеристиками та моделями ДІ

Класифікацію інформаційних моделей ОУ, найбільш повно характеризує таблиця 1.1 [2].

## 1.2 Ентропійні моделі джерел інформації

На сьогоднішній день існує багато моделей джерел інформації (ДІ), швидкому поширенню яких сприяє розвиток КС та програмно-апаратних засобів обробки та використання даних. Поряд з цим виникають задачі, які неефективно вирішуються за допомогою наявних моделей ДІ, ставляться нові задачі, які потребують значно швидшої обробки.

Одним із пріоритетних напрямків вирішення задач даного типу є застосування ентропійного підходу та побудови відповідної ентропійної моделі, яка б найбільш адекватно відображала системні характеристики ДІ [8, 9].

Ентропія має інтегральні характеристики по відношенню до інших моделей, що може бути ефективно застосовано при аналізі та оптимізації технологічних

процесів. Визначення ентропії ДІ дозволяє оцінити надмірність інформаційних потоків і призначити оптимальні процедури відбору інформації та її ефективного кодування [10]. У таблиці 1.2 наведені аналітичні вирази побудованих ентропійних моделей ДІ.

Таблиця 1.1 - Типи моделей об'єктів управління

№	Типи моделей ОУ	Аналітичний вираз
1	Сигнальні аналогові	$M = X(t)$
2	Сигнальні дискретизовані і квантовані	$M = X_i, i \in \overline{1, n}, 0 \leq x_i \leq A,$ де $X_i$ – дискретизоване квантоване значення ОУ, $n$ – об'єм вибірки, $A$ – діапазон квантування
3	Дискретні диференціальні	$M = \Delta X_i = X_{i+1} - X_i,$ де $\Delta X_i$ – перші прирости станів ОУ.
4	Дискретні інтегральні	$M = \sum_{i=1}^k X_i,$ де $k$ – число сумувань дискретних станів ОУ.
5	Статистичні:	
5.1	Вибіркове математичне сподівання	$M_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
5.2	ковзне математичне сподівання	$M_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1+j}^{m+j} X_{i+j}, j = 0, 1, 2, \dots$ де $j = 0, 1, 2, \dots$ – дискретний зсув;
5.3	вагове математичне сподівання	$M_v = \sum_{i=1+j}^{m+j} V_{i-j} \cdot X_{i+j},$ де $V_i$ – вагова функція;
5.4	дисперсія	$D_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - M_x)^2$
5.5	середньоквадратичне відхилення	$\sigma_x = \sqrt{D_x}$
6	Автокореляційні моделі	$B_{xx}(j), H_{xx}(j) \dots$

Р.Хартлі [11] запропонував функцію логарифма числа можливих станів ДІ, де  $H$  – кількість інформації;  $S$  – число незалежних рівноймовірних станів ДІ;  $n$  – число вибірок.

При кодуванні безперервних ДІ, А.Н.Колмогоровим [12] запропонована міра інформації – епсилон:

Таблиця 1.2 – Ентропійні моделі джерел інформації

№	Назва інформаційної міри	Аналітичний вираз
1.	Хартлі	$H = \log S^n = n \cdot \log S$
2.	Шеннона	$H = -K \sum_{i=1}^n P_i \log P_i$
3.	$3\delta_x$	$H = \log 3\sigma$
4.	Боюна	$h_{\Delta} = \frac{ f'_{cep}(t) }{ f'_{max}(t) }$
5.	Колмогорова	$H_E(F) \leq \frac{T}{\Delta t} + \log \frac{C}{E},$
6.	Николайчука	$I_x = n \cdot E \left[ \frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left( D_x^2 - R_{xx}^2 \right) \right]$
7.	Лонго	$H(u, p) = -k \sum_{i=1}^n [u_i p_i \cdot \log p_i]$
8.	Шульца	$H(p, w) = - \sum_{i=1}^n \left[ \frac{p_i w_i}{\sum_{j=1}^n p_j w_j} \cdot \log \frac{p_i w_i}{\sum_{j=1}^n p_j w_j} \right]$
9.	Олівера	$N = \frac{n!}{\prod_j S_j}$
10.	Мідлтона	$H(X) = - \sum_{l_1}^L \dots \sum_{l_n}^L p(X) \log p(X)$
11.	Таллера	$H \leq k2BT \left( 1 + \frac{S}{N} \right)$

$$H_E(F) \leq \frac{T}{\Delta t} + \log \frac{C}{E}, \quad (1.1)$$

де  $C$  - діапазон квантування;

$T$  - інтервал часу спостереження ДІ.

Більшість технологічних об'єктів, які в даному випадку розглядаються як стохастичні ДІ, формують дані, що підлягають гаусовому закону розподілу імовірностей. Для таких ДІ переважна більшість відліків лежить в діапазоні  $3\sigma$  в околі математичного сподівання. Відповідно, ентропія буде визначатися згідно виразу:

$$H = \log 3\sigma. \quad (1.2)$$

Оцінки ентропії ДІ у вигляді міри Р. Хартлі і ентропії А. Колмогорова вирішувані в цілих числах в тому випадку, якщо діапазон квантування станів ДІ вибирається кратним цілому степеню числа два.

К. Шенноном введена оцінка ентропії [13] для ДІ з нерівноймовірними станами, де  $K$  - позитивна постійна, яка враховує основу логарифма;  $P_i$  - вірогідність  $S_i$ -го стану дискретного ДІ.

Дж. Лонго [14] запропонував розширити шеннонівську теорію інформації введенням "якісних" параметрів, які б характеризували корисність інформації, тоді як шеннонівське визначення використовує тільки імовірнісні (повторюваність) стану ДІ без будь-якої семантики. Кожному стану ДІ Дж. Лонго ставить у відповідність коефіцієнти корисності  $u_i \geq 0$ .

Розподіл коефіцієнтів корисності не залежить від розподілу ймовірностей, а визначається з семантичних міркувань. Тоді кількість інформації буде визначатися за виразом:

$$I(u, p) = -k u \cdot \log p, \quad (1.3)$$

де  $k$  – стала величина;

$p = p_i$  – імовірність  $S_j$ -го стану.

Ентропія корисності визначається як середнє статистичне значення усіх можливих повідомлень, з врахуванням коефіцієнтів  $u_i$ :



$$H(u, p) = -k \sum_{i=1}^n [u_i p_i \cdot \log p_i]. \quad (1.4)$$

Якщо всі  $u_i = const$ , то ентропія корисності переходить в звичайну шеннонівську ентропію ДІ.

Для некорисних станів, імовірність яких  $p_i > 0$ , вважаються  $u_i = 0$ . Якщо з умови  $u_i > 0$  випливає, що  $p_i = 0$ , то це означає, що корисні стани неможливі.

Г. Шульц [15] намагався узагальнити шеннонівську ентропію і тим самим створити поняття оціночної ентропії. Він видозмінив ентропію як середнє значення об'єму інформації  $\log \frac{1}{p_i}$  окремих станів, щоб її можна було б використовувати не тільки для передачі, але й для оцінки значимості інформації. Шульц встановив оціночну шкалу, по якій найбільш «несприятливому» стану надавалось найнижче значення, а найбільш сприятливому стану – найвище. Для зручності користування значення шкали вибиралися кратними степеню числа 2:  $W_0 = 2^0 = 1$ ,  $W_1 = 2^1 = 2$ ,  $W_2 = 2^2 = 4, \dots, W_n = 2^n$ .

З цих значень утворювалися оціночні коефіцієнти від  $w_0 = \frac{W_0}{\sum_{i=1}^n W_i}$  до

$w_n = \frac{W_n}{\sum_{i=1}^n W_i}$ . Вони еквівалентні послідовності частот  $p_i$ .

Для джерел з незалежними, але нерівноймовірними станами Б.Олівером отримана оцінка загальної кількості можливих комбінацій станів:

$$N = \frac{n!}{\prod_j S_j}, \quad (1.5)$$

або в логарифмічному вигляді:

$$\log N = \log n! - \sum_j^n S_j, \quad (1.6)$$

яке на основі наближення Стірлінга

$$\log N \rightarrow \log \sqrt{2\pi n} + n \cdot \log n - n \sum_{j=1}^n \log \sqrt{2\pi S_j} - n \sum_{j=1}^n p(j) \cdot \log p(j) - n \cdot \log n + n \quad (1.7)$$

зводиться до виразу:

$$H = \lim \frac{\log N}{n} = - \sum p(j) \cdot \log p(j), \quad (1.8)$$

що співпадає з шеннонівським визначенням ентропії.

Д. Мідлтон [16] також досліджував дискретні ДІ, які формують послідовність символів довільної довжини, розподілених в визначеному порядку в часі. Для реалізації дискретної випадкової послідовності  $X = \{x_i\}$ , кожен із символів  $x_i$  якої може приймати одне з  $l_i$  різних значень ( $l \leq l_i \leq L$ ;  $i = 1, 2, \dots, n$ ), отримано вираз для апіорної невизначеності  $x_1, \dots, x_i, \dots, x_n$ :

$$H(X) = - \sum_{l_1}^L \dots \sum_{l_n}^L p(X) \log p(X), \quad (1.9)$$

де додавання проводиться по всім можливим значенням кожного з символів  $x_i$  послідовності.

Для ДІ з статистично залежними станами Д. Мідлтон визначив вираз середньої умовної ентропії:

$$H(X/Y) = \sum_{l_1}^L \dots \sum_{l_n}^L \sum_{m_1}^M \dots \sum_{m_k}^M p(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m) \cdot \log p(x_1, \dots, x_n / y_1, \dots, y_m), \quad (1.10)$$

де  $x_i, y_i$  – статистично залежні стани ДІ.

З останнього виразу випливає, що для розрахунку ентропії таких ДІ необхідно знати сумісні щільності ймовірностей різного порядку  $W_1(y_1, t_1), W_1(y_1, t_1; y_2, t_2), \dots, W_1(y_1, t_1; \dots; y_n, t_n)$ .

При вивченні статистичних моделей показано, що на практиці ДІ не є настільки статистично складними, щоб їх описувати багатомірними розподілами.

Зокрема, для повного опису ергодичних стаціонарних ДІ достатньо знати двомірні розподіли і відповідно статистично середні. Природно, що ентропія і швидкість створення повідомлень такими джерелами, за рахунок кореляційних зв'язків між різними послідовностями символів і нерівномірності розподілу імовірності символів, виявляються меншими в порівнянні з оцінкою інформаційної міри Хартлі.

В роботі В. Таллера [17] підкреслюються переваги, які можна отримати шляхом кореляційного аналізу і усунення внутрішньої кореляції повідомлень, що формуються джерелом. Показано, що якщо в деякий момент часу ДІ, що має  $s$  станів, переходить тільки в  $s_j$  можливих станів, то аналіз дійсного інформаційного змісту його повідомлень приводиться до меншого об'єму інформації в порівнянні з функцією найбільшої інформації:

$$H \leq k2BT \left( 1 + \frac{S}{N} \right), \quad (1.11)$$

де  $H = k \cdot n \log S_{ave}$ ;

$S_{ave}$  – середнє значення станів ДІ;

$BT$  – інформаційна база повідомлень, що формується;

$N$  – значення шуму.

Досліджуючи оцінки інформації дискретних випадкових величин В.П. Боюн [18] запропонував величину  $\delta$ -ентропію, яка характеризує невизначеність значення випадкового процесу і його динаміку.

У виразі для ентропії Боюна  $f'_{cep}(t)$ ,  $f'_{max}(t)$  – відповідно середнє і максимальнє значення похідних зміни кількості станів джерела.

Приведена  $\delta$ -ентропія не залежить від вибраних кванта по рівню і кроку дискретизації, а повністю визначається законом розподілу похідних.

В роботі Л. Г. Лапи відмічено, що для визначення ймовірнісних показників джерел інформації необхідні детальні характеристики кореляційних зв'язків між різними символами. Там же підкреслюється, що чим більша кореляція між станами ДІ, тим більш нерівноймовірний розподіл умовної ймовірності  $p_{i/x_j}$  у виразі визначення ентропії ДІ з залежними станами, що приводить до зменшення ентропії джерела.

Л. Г. Лапа [19] також звертає увагу на те, що функція ентропії Хартлі користується виключно одновимірними розподілами, в той час як він використовує двовимірні ймовірнісні розподіли. Тому принципово оцінка ентропії на базі кореляційної функції змістовніша, ніж функція ентропії Хартлі.

До аналогічного твердження приходить Ж. Макс [20], визначаючи зв'язок коефіцієнта кореляції з оцінками ентропії доводить, що середнє значення двовимірної щільності ймовірності (кореляція) несе більше інформації про ентропію, ніж середні одновимірної щільності.

С. Голдман [21] також розширює теорію інформації Шеннона, застосовуючи поняття КФ і відмічає, що кореляційний аналіз є зв'язуючим елементом між спектральною теорією і теорією інформації.

Оцінкою ентропії, яка максимально наближується до власної ентропії ДІ є інформаційна міра, запропонована Я.М. Николайчуком [2]:

$$I_x = n \cdot E \left[ \frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left( (D_x^2 - R_{xx}^2) \right) \right] \quad (1.12)$$

де  $D_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - M_x^2$  - дисперсія значень  $x_i$ ;

$$M_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \text{математичне сподівання};$$

$$R_{xx} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot x_{i+j} - \text{автокореляційна функція};$$

$$x_i = x_i - M_x - \text{центровані значення масиву даних};$$

$m$  - число точок функції  $R_{xx}$  на інтервалі кореляції.

### 1.3 Методи визначення ентропії джерел інформації

Ентропійні характеристики інформаційних даних є важливими оцінками об'ємів масивів інформації. Наприклад, найчастіше така оцінка виконується у базисі Радемахера, тобто двійковій системі числення, у наступних одиницях: бітах (0 та 1), байтах (8 біт), кілобайтах (1024 байт), мегабайтах ( $10^6$  байт), гігабайтах ( $10^{12}$  байт) та терабайтах ( $10^{18}$  байт).

Незважаючи на широке використання перелічених одиниць об'ємів інформаційних даних, методологія оцінки об'ємів інформації та власної ентропії джерел інформації потребує глибоких теоретичних та експериментальних досліджень. При цьому треба врахувати, що в теорії інформації, започаткованої К.Шенноном під поняттям "інформація" розуміють міру невизначеності стану об'єкта дослідження. Корисну інформацію, тобто нову інформацію отримуємо тільки тоді, коли спостерігається певна невизначеність відносно стану джерела інформації. Наприклад, якщо зафіксоване повідомлення  $x_0$ , про стан об'єкта джерела інформації і це повідомлення багато разів повторюється без змін, тобто  $x_i = x_0, i=1, 2, \dots, n$ , то корисну (значиму) інформацію несе тільки перше повідомлення  $x_j$ , а всі аналогічні повідомлення характеризуються нульовою ентропією ( $I_x$ ) (рисунок 1.3).

В той же час, якщо об'єкт - джерело інформації може в один момент часу перебувати в  $A$  різних станах, тобто  $0 \leq x_j < A$ , то число однакових повідомлень про джерело у стані  $x_i$  суттєво впливає на оцінку його ентропії.

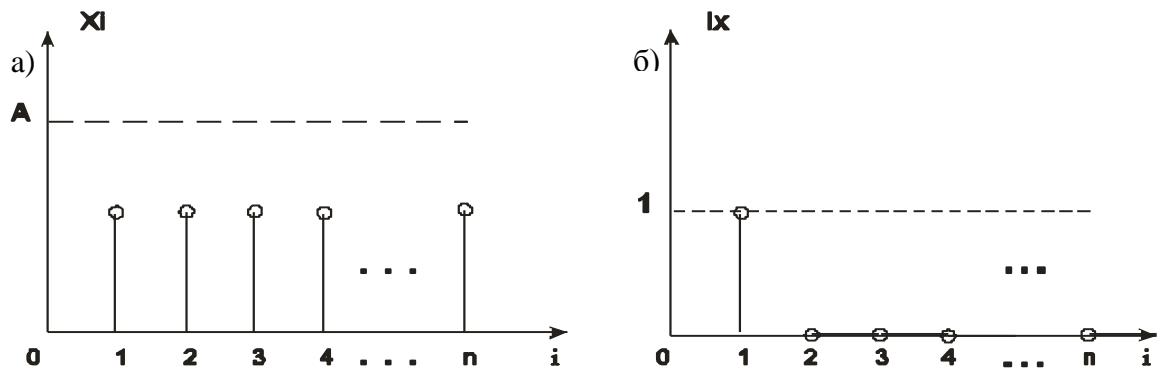


Рисунок 1.3 - Оцінка ентропії (корисності, значимості ідентичних інформаційних повідомлень). а) ідентичні інформаційні повідомлення; б) ентропія ідентичних інформаційних повідомлень

Світовий аналіз та досвід застосування методологій оцінки ентропії інформаційних даних показує, що верхню межу об'єму інформації з врахуванням рівномірного статистичного розподілу (рівноймовірних значень  $x_i$ ) вираховують на основі інформаційної міри Р. Хартлі.

Дана оцінка ентропії ДІ базується на припущенні, що всі значення  $x_i$  в діапазоні  $0 \div A$  розподілені з однаковою ймовірністю  $P_i = 1/A$  (На рисунку 1.4 показаний приклад такого масиву ДІ при  $n=8, A=8$ ).

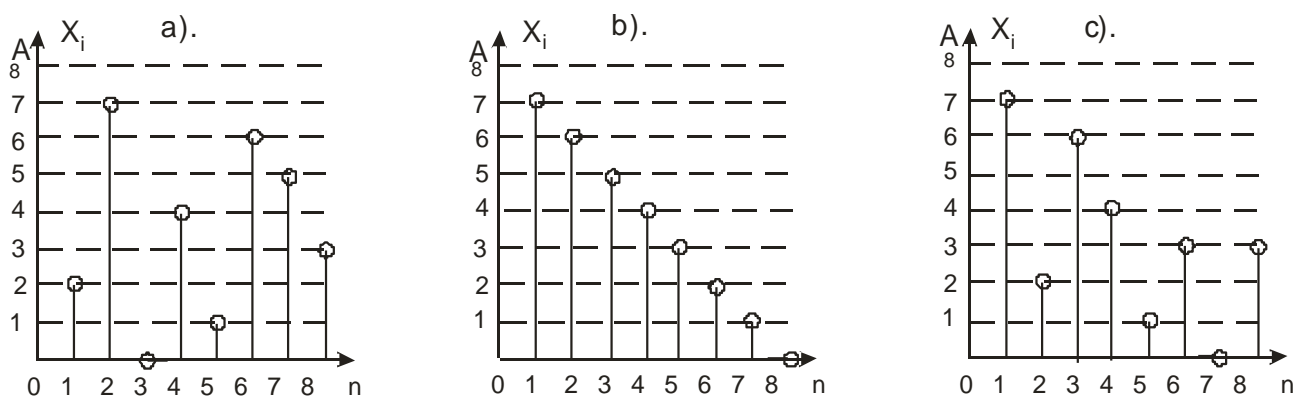


Рисунок 1.4 - Інформаційні дані з рівноймовірним розподілом значень

У всіх випадках прикладів *a*, *b*, та *c* (рисунок 1.4) інформаційна міра Р. Хартлі дає наступну однакову оцінку ентропії масиву повідомлень  $x_i \in \{2, \dots, n\}$ :

$$I_x = 8 \cdot \hat{E} \left[ \log_2 8 \right] = 8 \cdot 3 = 24 \text{ біт} = 3 \text{ байт}. \quad (1.13)$$

Очевидно, що інформаційна міра ентропії Р. Хартлі, яка не враховує взаємні кореляційні зв'язки між різними повідомленнями  $x_i$  та  $x_j$ , є неадекватною власній ентропії джерела інформації і може бути застосована тільки в умовах повного незнання статистичних характеристик станів джерел інформаційних даних. Другою відомою оцінкою ентропії ІД є інформаційна міра К. Шеннона, яка розраховується за аналітичним виразом (1.9).

У виразі (1.9) знак "—" враховує від'ємність значень функції  $\log_2 P_i$  при  $P_i < 1$ .

Аналіз виразу (1.9) показав, що максимальною ентропією  $I_x=1$  біт характеризуються ДІ представлені двома значеннями  $x_i$  з ймовірністю появи  $P_i = 0,5$ .

Інформаційна міра К. Шеннона покладена в основу кодів Шеннона-Фано [22] для ефективного стиснення та кодування алфавітно-цифрових та текстових даних за рахунок врахування різної ймовірності (частоти) появи окремих букв алфавіту у текстових документах. Вказані коди також використані при розміщенні клавіш символів в стандартній клавіатурі персональних комп'ютерів. При цьому найбільш часто вживані символи розміщені в центрі клавіатури, а рідко вживані (менш ймовірні) по периферії клавіатури. Дана ентропійна оцінка широко використовується при розміщенні та ідентифікації ІД в базах даних, діалогових, дорадчих та експертних інформаційних системах.

Приклад нерівноймовірних випадкових даних поданий на рисунку 1.5. Для прикладу (див. рисунок 1.5) ентропія по К. Шеннону  $I_x = 16 \cdot 3 = 8$  біт, в той час, як оцінка Р.Хартлі  $I_x = 16 \cdot 4 = 64$  біт.

Дуже часто ДІ характеризуються нормальним законом ймовірного розподілу, для якого ентропія визначається згідно виразу:

$$I_x = \log_2 \sqrt{2\pi e \delta_x^2}, \quad (1.14)$$

який з врахуванням цілочисленної функції  $\hat{\Sigma} [ \dots ]$  наближається до відомої

оцінки ентропії "3δ<sub>x</sub>"  $I_x = \hat{E} [ \log_2 3\delta_x ]$ , де δ<sub>x</sub> - середньоквадратичне відхилення.

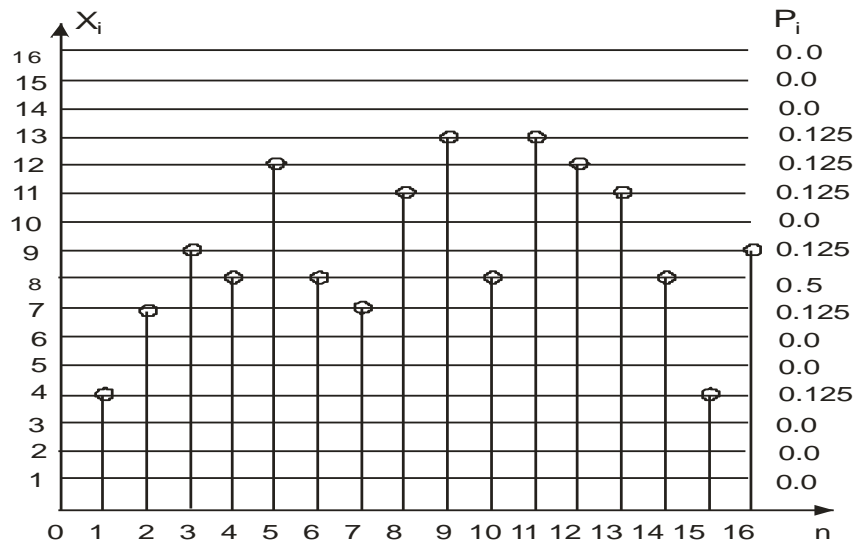


Рисунок 1.5 - Масив даних з нерівномірними значеннями  $x_i$  ( $A=16, n=16$ )

На рисунку 1.6 показаний приклад визначення ентропії масиву даних з нормальним розподілом ймовірностей значень  $x_i$ .

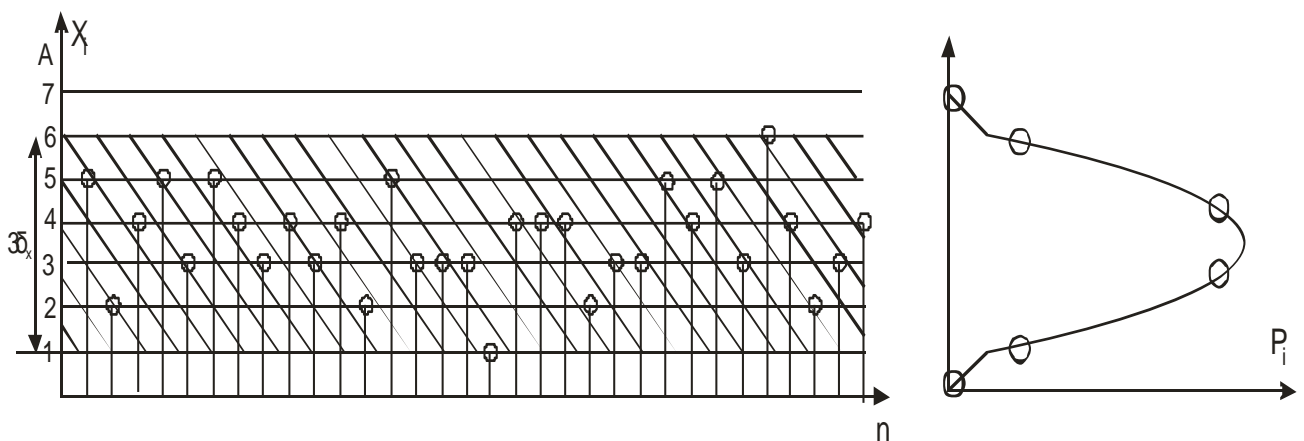


Рисунок 1.6 - ДІ з нормальним законом розподілу ( $A=8, n=32, M_x=4, D_x=2, \delta_x=1.66$ )

Заштрихована зона значень  $X_i$  шириною  $3\delta_x$  демонструє найбільш ймовірні та інформаційно значимі дані, які визначають власну ентропію повідомлень масиву даних.



Інформаційна міра К. Шеннона та міра “ $3\delta_x$ ”, в принципі, неадекватно відображають власну ентропію ДІ тому, що вони не враховують взаємодіяційні (статистичні, логічні) зв’язки та властивості між різними значеннями отриманих інформаційних повідомлень, тобто взаємну ентропію між  $x_i$  та  $x_j$ ,  $i \neq j$ .

Дослідження в цій галузі показали, що найбільш загальною оцінкою ентропії, яка максимально наближується до власної ентропії ДІ є інформаційна міра, визначена в теоретичних дослідженнях в роботі [2]. Дана оцінка вираховується на основі врахування взаємної ентропії та автокореляційних моделей згідно виразу

$$I_x = n \cdot \hat{E} \left[ \frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left( D_x - R_{xx}^2 \right) \right], \quad (1.15)$$

де  $D_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - M_x)^2$  - дисперсія значень  $x_i$ ;

$M_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$  - математичне сподівання;

$R_{xx}(m) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot x_{i+m}$  - автокореляційна функція;

$x_i = x_i - M_x$  - центровані значення масиву даних;

$m$  - число точок функції  $R_{xx}(m)$  на інтервалі кореляції.

На рисунку 1.7 представлена асимптотика інформаційної міри ентропії за виразом (1.15).

#### 1.4 Кореляційні моделі, які використовуються для розрахунку ентропії

Очевидно, що інформаційна міра ентропії даних може бути обчислена на основі аналітичних виразів функцій кореляції, наприклад, структурної  $C_{xx}(m)$ ,

модульної  $G_{xx}$  та інш., що потребує більш детальних і глибоких досліджень доцільності та ефективності їх застосування в практиці.

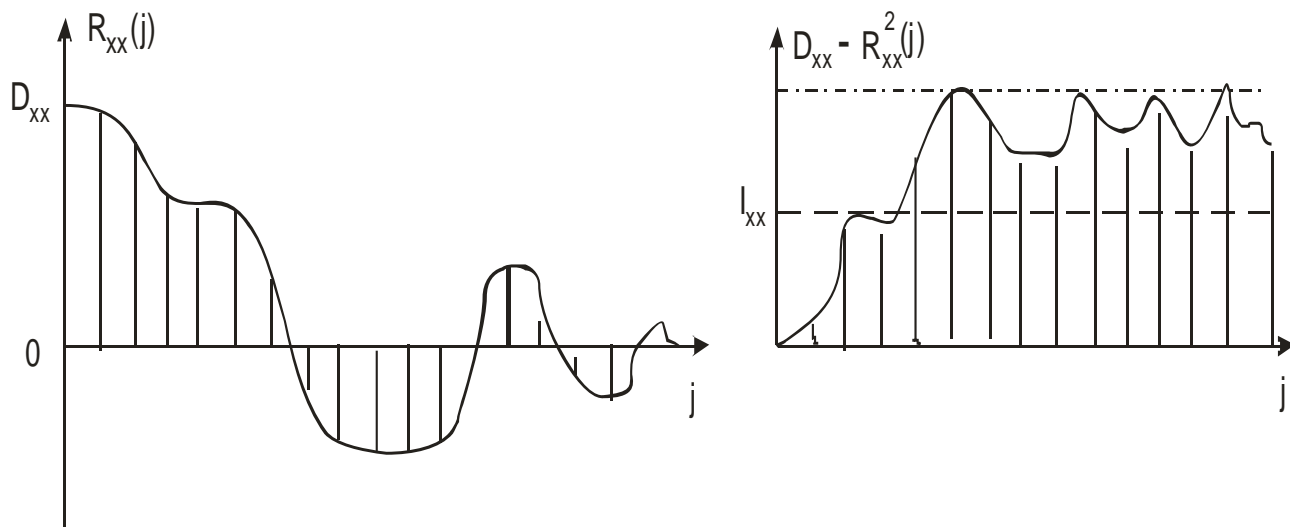


Рисунок 1.7 - Асимптотика інформаційної міри ентропії з врахуванням взаємкореляційних зв'язків між даними

Відомі багатоканальні пристрої обчислення кореляційних функцій на основі коваріаційної, кореляційної, структурної, модульної та еквівалентності [23], описуються аналітичними виразами та відповідною асимптотикою, представленою в таблиці 1.3.

Між названими кореляційними функціями існує зв'язок, представлений взаємно аналітичними перетворення (таблиця 1.4).

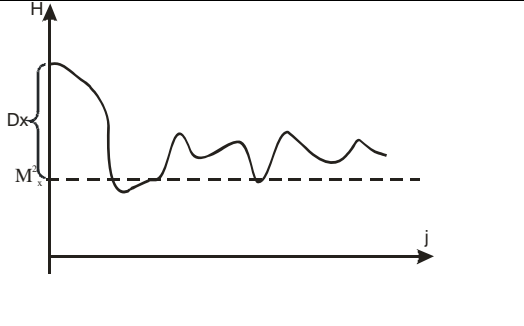
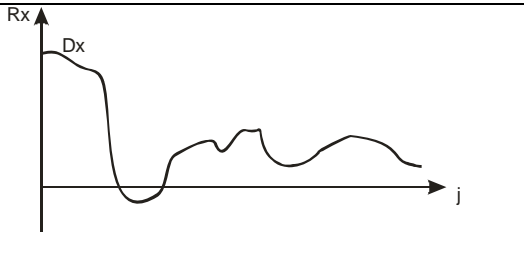
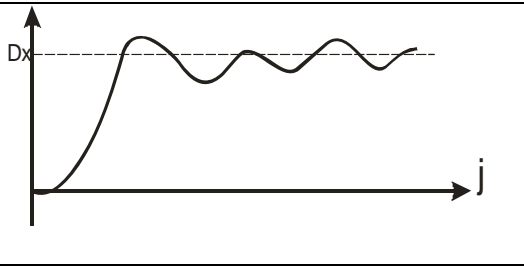
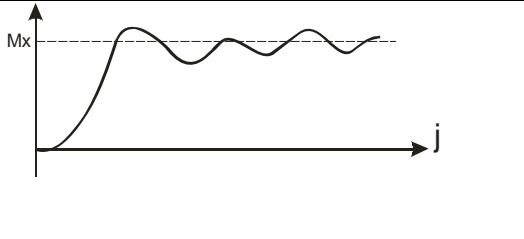
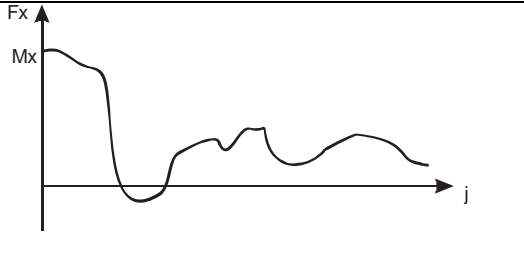
Існують також нормовані кореляційні функції, аналітичні вирази яких представлені в таблиці 1.5.

Для розрахунку ентропії можуть бути використані автокореляційні моделі, які описуються відповідними аналітичними виразами:

$$1) \text{ автоковаріація: } K_{xx} \hat{=} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot x_{i+j} ;$$

$$2) \text{ автокореляція: } R_{xx} \hat{=} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^\circ \cdot x_{i+j}^\circ ;$$

Таблиця 1.3 – Кореляційні функції, їх аналітичні вирази та асимптотика

№	Аналітичний вираз	Асимптотика кореляційної функції	
1.	$K_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot x_{i+j}$		$K_{xx}(0) = D_x + M_x^2;$ $K_{xx}(\infty) = M_x^2;$ $n \geq 256.$
2.	$R_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot x_{i+j}$		$R_{xx}(0) = D_x;$ $R_{xx}(\infty) = 0;$ $n \geq 256.$
3.	$C_{xx}(j) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - x_{i+j})^2$		$C_{xx}(0) = 0;$ $C_{xx}(\infty) = D_x;$ $n \geq 256.$
4.	$G_{xx}(j) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n  x_i - x_{i+j} $		
5.	$F_{xx}(j) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Z_{ij}$		$F_{xx}(0) = M_x;$ $F_{xx}(\infty) = 0;$ $n \geq 128.$

3) нормована автокореляція:  $\rho_{xx}(j) = \frac{R_{xx}(j)}{D_x}$  ;

4) структурна кореляція:  $C_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{i+j})^2$  ;

Таблиця 1.4 – Зв'язок між кореляційними функціями

№	Зв'язок кореляційних функцій	Аналітичний вираз
1.	$K_{xx}(j), R_{xx}(j)$	$K_{xx}(j) = R_{xx}(j) + M_x^2$
2.	$C_{xx}(j), K_{xx}(j), R_{xx}(j)$	$C_{xx}(j) = 2 D_x + M_x^2 - K_{xx}(j)  = 2 D_x - R_{xx}(j) $
3.	$G_{xx}(j), \check{F}_{xx}(j)$	$G_{xx}(j) = 2\left(M_x - \check{F}_{xx}(j)\right)$
4.	$\rho_{xx}(j), g_{xx}(j)$	$\rho_{xx}(j) = 1 - \frac{G_{xx}^2(j)}{2\mu_x \sigma_x^2}$
5.	$G_{xx}(j), R_{xx}(j)$	$G_{xx}(j) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{D_x - R_{xx}(j)}$
6.	$\rho_{xx}(j), H_{xx}(j)$	$\rho_{xx}(j) = \sin\left[\frac{\pi}{2} H_{xx}(j)\right]$
7.	$B_{xx}(j), \check{F}_{xx}^2(j), G_{xx}(j)$	$B_{xx}(j) = 2\check{F}_{xx}^2(j) + G_{xx}(j)$
8.	$Q_{xx}(j), \check{F}_{xx}^2(j), G_{xx}(j)$	$Q_{xx}(j) = 2\check{F}_{xx}^2(j) + 2\frac{1}{n} \sum_i \check{z}_i \cdot  x_i - x_{i+j}  + C_{xx}(j)$

Таблиця 1.5 – Нормовані кореляційні функції

№	Нормована функція	Аналітичний вираз
1.	$\rho_{xx}(j)$	$\frac{R_{xx}(j)}{D_x}$
2.	$C_{xx}(j)$	$\frac{C_{xx}(j) - D_x}{D_x}$
3.	$g_{xx}(j)$	$\frac{C_{xx}(j)}{M_x} - M_x$
4.	$F_{xx}(j)$	$\frac{F_{xx}(j)}{M_x}$
5.	$R_{xx}(j)$	$\frac{K_{xx}(j) - M_x^2}{D_x}$

$$5) \text{ модульна кореляція: } G_{xx} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - x_{i+j}|;$$

$$6) \text{ нормована модульна кореляція: } q_{xx} \stackrel{\text{def}}{=} G_{xx} / M_x;$$

$$7) \text{ автоеквівалентність: } F_{xx} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_{i,i+j},$$

$$\text{де } x_i^\circ = x_i - M_x - \text{центровані значення } x_i; Z_{i,i+j} = \begin{cases} |x_i^\circ|, & |x_i^\circ| < |x_{i+j}^\circ| \\ |x_{i+j}^\circ|, & |x_i^\circ| \geq |x_{i+j}^\circ| \end{cases}.$$

Очевидно, що в залежності від типу використовуваної функції автокореляції ефективність розрахунку ентропії програмно-апаратних засобів буде відрізнятися. У зв'язку з тим, що окремі функції передбачають наявність досить громіздких операцій множення, піднесення до квадрату або до степеня, то обчислення центрованих значень, математичного сподівання та дисперсії, перспективним для розрахунку оцінок ентропії ДІ є використання модульної та еквівалентної функцій автокореляції.

Реалізація ентропійних моделей на основі відповідних функцій автокореляції дозволяє зняти існуючі функціональні обмеження, які присутні при розрахунку ентропії на основі інформаційних мір Р.Хартлі та К. Шеннона. Оскільки перша не враховує статистичного розподілу потоку інформаційних даних, а друга враховує тільки ймовірності станів джерел інформації і не враховує ймовірностей їх переходу з одного стану в інший, що реалізується в інформаційних мірах ентропії на основі функцій кореляції, запропонованих проф. Николайчуком Я.М. [2].

Серед розглянутих інформаційних мір ентропії найбільш повно опирається на статистичні характеристики міра ентропії на базі кореляції.

## Висновки до розділу 1

1. Виконана класифікація стаціонарних, квазістаціонарних та нестаціонарних джерел інформації та їх моделей, на основі яких встановлено, що в склад характеристичного функціоналу, який описує стани складних об'єктів управління входять ентропійні моделі, причому вони будуються як інтегровані характеристики станів джерел інформації на основі багатьох сигнальних, статистичних, кореляційних та інших моделей.

2. Систематизовано теоретичні засади оцінки ентропійних характеристик джерел інформації, проаналізовані їх функціональні можливості, на основі яких обґрунтовано перспективи використання ентропійно-кореляційної міри інформації для реалізації програмно-апаратних засобів, діагностування, контролю станів промислових об'єктів управління.

## 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ОЦІНОК ЕНТРОПІЙНИХ ТА КОРЕЛЯЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

### 2.1 Теоретичні основи оцінки ентропії

Залежно від динаміки зміни інформаційних станів ДІ класифікують на три типи: стаціонарні; квазістаціонарні; нестаціонарні.

Реальні ДІ найчастіше належать до класу квазістаціонарних джерел, ентропійні моделі яких досліджувалися при вирішенні завдань адаптації по станах, прогнозу випадкових процесів і ефективного кодування. Стаціонарність динамічних і кореляційних показників, стабільність швидкості створення повідомлень при виконанні об'єктами різних технологічних і функціональних операцій визначає тимчасові параметри квазістаціонарних ДІ. Для таких джерел характерним є стрибкоподібний перехід з одного інформаційного стану в інший.

В якості практичної міри ентропії дискретного джерела інформації використовується функція логарифма числа можливих станів ДІ

$$H = \log \cdot S^n = n \log S, \quad (2.1)$$

де  $H$  - кількість інформації;

$S$  - число незалежних рівноімовірних станів ДІ;

$n$  - число вибірок.

Дана інформаційна міра не враховує надмірності ДІ за рахунок нерівноімовірності розподілу різних  $S_j$ -станів. Тому вона є верхньою оцінкою ентропії джерела.

При кодуванні безперервних ДІ із заданою точністю квантування по рівню  $E$  і кроці дискретизації за часом, використовується міра інформації – епсилон як ентропія, яка визначається числом елементів  $E$ -мережі під час переходу ДІ в різні стани:

$$H_E(F) \leq \frac{T}{\Delta t} + \log \frac{C}{E}, \quad (2.2)$$

де  $\Delta t = \frac{E}{L}$ ;

$C$  - діапазон квантування;

$T$  - інтервал часу спостереження ДІ.

Визначивши число функцій, яке може бути отримане у  $F$  - просторі за час  $T$  у вигляді  $\varphi(t) = 2^{\frac{T}{\Delta t}}$  отримаємо:

$$H_E \leq \log_2 \left( \frac{C}{E} \cdot 2^{\frac{T}{\Delta t}} \right) \quad (2.3)$$

У окремому випадку, коли  $\frac{C}{E} = 2^m$  і  $\frac{T}{\Delta t} = 2^n$  маємо:

$$H_E = \log_2(2^m \cdot 2^n) = m + n \quad (2.4)$$

тобто отримуємо ентропію двійково-кодованого ДІ.

Попередні оцінки ентропії ДІ розглядаються в цілих числах в тому випадку, якщо діапазон квантування станів ДІ вибирається кратним цілому степеню числа два. У інших випадках, коли  $S \neq 2^K$  ( $K = 1, 2, \dots$ ) необхідно користуватися оцінкою

$$H_n = n \cdot \hat{E} \left[ \log_2 S \right] \approx n \bar{S} \quad (2.5)$$

де  $\hat{E}$  - символ цілочисельної функції з округленням до більшого;

$\bar{S}$  - ознака операції округлення до більшого цілого.

Приведені оцінки ентропії ДІ засновані на умові, що кожний  $S_j$  стан джерела кодується розрядними двійковим кодом однакової довжини. Розглянуті



оцінки ентропії відповідають ДІ з рівноймовірними станами  $i$ , як правило, є максимальними.

Для ДІ з нерівноймовірними станами використовується міра ентропії[5]

$$H = -K \sum_{i=1}^n P_i \log P_i, \quad (2.6)$$

де  $K$  - позитивна постійна, яка враховує основу логарифма;

$P_i$  - вірогідність  $S_i$ -го стану дискретного ДІ.

Чим більше кореляція між наступними один за одним символами або відліками повідомлень, що генеруються ДІ, тим більше нерівномірні розподіли і це веде до зменшення ентропії.

Для реалізації дискретної випадкової послідовності  $X = \{x_i\}$  кожен з символів  $x_i$ , може приймати одне із  $l_i$  різних значень  $(1 \leq l_i \leq L, i = 1, \dots, n)$ , отриманий вираз для апіорної невизначеності щодо послідовності  $\{x_1, \dots, x_i, \dots, x_n\}$

$$H(X) = - \sum_{l_1=1}^{L_1} \dots \sum_{l_n=1}^{L_n} P(x) \log P(x), \quad (2.7)$$

де підсумовування проводиться по всіх можливих значеннях кожного з символів  $x_i$ .

Для даного джерела визначено вираз середньої умовної ентропії:

$$H\left(\frac{X}{Y}\right) = - \sum_{l_1=1}^{L_1} \dots \sum_{l_n=1}^{L_n} \sum_{m_1=1}^{M_1} \dots \sum_{m_m=1}^{M_m} P(x_1, \dots, x_n; y_1, \dots, y_m) \cdot \log P(x_1, \dots, x_n; y_1, \dots, y_m) \quad (2.8)$$

де  $x_i, y_i$  - статистично залежні стани ДІ.

З останнього виразу виходить, що для розрахунку ентропії таких ДІ потрібне знання сумісної щільності імовірності різного порядку.

На практиці ДІ не є так статистично складними, щоб їх описувати багатовимірними розподілами. Зокрема для повного опису стаціонарних ДІ достатньо знання двовимірних розподілів і відповідних статистичних середніх. Природно, що ентропія і швидкість створення повідомлень такими джерелами, за рахунок кореляційних зв'язків між різними послідовностями символів, виявляються меншими в порівнянні з оцінкою інформаційної міри Хартлі.

Можна підкреслити переваги, які можна отримати шляхом кореляційного аналізу і усунення внутрішньої кореляції повідомлень, що формуються джерелом. Якщо в деякий момент часу ДІ, що має  $S$  станів переходить лише в  $S_j$  можливих станів, то аналіз істинності інформаційного змісту його повідомлень приводить до меншого об'єму інформації в порівнянні з функцією найбільшої інформації:

$$H \leq k2BT \left( 1 + \frac{S}{N} \right), \quad (2.9)$$

де  $H = kn \cdot \log \text{ Save}$  ;

$\text{Save}$  - середнє значення станів ДІ;

$BT$  - інформаційна база формованих повідомлень;

$N$  – значення шуму.

При цьому встановлення вимоги найбільшої інформації засноване на твердженні, що неможливе аналітичне продовження функції інформації з точністю більшою чим  $\frac{1}{S}$ , впродовж інтервалу між відліками.

Таким чином, поставлено завдання аналізу квазістаціонарних ДІ, а величина  $\frac{1}{S}$  отримує смисл інтервалу кореляції між відліками, відповідними станам ДІ.

Численними дослідженнями реальних об'єктів управління і ДІ показано, що параметри технологічних об'єктів на локальних відрізках часу досить точно описуються моделлю двовимірного гаусівського розподілу ймовірностей.

Тому для оцінки сумісної диференціальної ентропії таких джерел скористаємося виразом:

$$h(X_{i+\tau}) = \log_2 \left( \pi e \delta_x^2 \sqrt{1 - \rho_{xx}^2} \right), \quad (2.10)$$

яке для дискретних ДІ має вигляд

$$H(x_i, x_j) = \log_2 2\pi e + \log_2 \delta_x^2 \sqrt{1 - \rho_{xx}^2}, \quad (2.11)$$

де перший елемент представляє константу інформаційної міри, пов'язану з основою логарифма, яка може не враховуватися в обчисленнях, а другий елемент представляє дисперсію процесу і взаємну ентропію нерівноімовірних корельованих станів ДІ.

На інтервалі кореляції  $j = \tau$ , який визначається з умови  $\rho_{xx} \leq 0,1$ , оцінку ентропії таких ДІ можна визначити по формулі

$$I_{\text{ши}} = H(x_i, x_j) = \frac{1}{\tau} \sum H(x_i, x_j) \quad (2.12)$$

Розрахунок ентропії ДІ на основі нормованої автокореляційної функції  $\rho_{xx}(j)$  є незручним в обчислювальному плані у зв'язку з необхідністю центрування послідовності відліків  $x_i$ .

Простіше обчислюється модульна функція автокореляції  $G_{xx}(j)$ , яка має аналітичний зв'язок з функцією  $\rho_{xx}(j)$  у вигляді

$$G_{xx}(j) = 2 \sqrt{\frac{\sigma_x^2 - R_{xx}(j)}{\pi}} \quad (2.13)$$

де

$$R_{xx}(k) = \delta_x^2 \rho_{xx}(k) \quad (2.14)$$

звідки

$$\rho_{xx}(k) = \frac{\pi}{4} q_{xx}^2(k) = 1, \quad (2.15)$$

причому

$$q_{xx}(k) = \frac{G_{xx}(k)}{\delta_x} \quad (2.16)$$

нормована модульна функція автокореляції.

Після нескладних перетворень оцінку ентропії отримаємо у вигляді:

$$I_{uu} = \frac{1}{\tau} \sum_{j=0}^{\tau} \log \frac{\pi e \sqrt{\pi}}{2} G_{xx}(k) \sqrt{8 - \pi q_{xx}^2(k)}, \quad (2.17)$$

яка аналогічним чином приводиться до трьох елементів:

$$I_{uu} = \log_2 \frac{\pi e \sqrt{\pi}}{2} + \frac{1}{\tau} \sum_{j=0}^{\tau} \log_2 G_{xx}(k) + \frac{1}{2\tau} \sum_{j=0}^{\tau} \log_2 \sqrt{8 - \pi q_{xx}^2(k)}, \quad (2.18)$$

де другий елемент представляє число - випадкову складову еквівалентну епсилон ентропії, а третій - взаємну ентропію корельованих відліків.

## 2.2 Кореляційні характеристики шумоподібних сигналів

Для оцінки шумоподібних сигналів (ШПС) використовуються 8 типів кореляційних функцій, які характеризуються різними параметрами точності та алгоритмічної складності [24]. В таблиці 2.1. подані аналітичні вирази та кореляційні функції кодів Баркера.

Таблиця 2.1 - Аналітичні вирази та кореляційні функції кодів Баркера

№	Назва функції	Аналітичний вираз	Кореляційна функція ШПС
1	2	3	4
1	знакова	$H_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{sign}(x_i) \times \text{sign}(x_{i+j})$	
2	релейна	$B_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \times \text{sign}(x_{i+j})$	
3	коваріаційна	$K_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \times x_{i+j}$	
4	кореляційна	$R_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \times x_{i+j}$	
5	нормована кореляційна	$\rho_{xx}(j) = \frac{R_{xx}(j)}{D_x}$	
6	структурна	$C_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{i+j})^2$	
7	модульна	$G_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  x_i - x_{i+j} $	

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4
8	еквівалентності	$F_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{Z}_{xx}$	

### 2.3 Ентропійні характеристики двовимірних та одновимірних шумоподібних сигналів

Очевидно, що використання різних (шумоподібних сигналів) ШПС має різну ефективність їх застосування. Для оцінки ефективності використання різних шумоподібних сигналів необхідно провести розрахунок на основі ентропійного підходу.

Аналітика розрахунку ентропії на основі кореляційних функцій має такий вигляд:

$$H(x_i, x_{i+j}) = \log_2 2\pi e \sqrt{D_x^2 - D_x^2 \cdot \rho_{xx}^2} = \log_2 2\pi e + \frac{1}{2} \log_2 \Phi_x - K_{xx}(j) \cdot P_x + K_{xx} \quad (2.19)$$

де  $D_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - M_x)^2$  - дисперсія значень  $x_i$ ;

$x_i = x_i - M_x$  - центровані значення масиву даних.

На рисунку 2.1 наведений розрахунок кореляційних характеристик та ентропії еталонного 7-бітного коду Баркера з захисним інтервалом 1 1 1 -1 -1 1 -1, який формується у вигляді восьмирівневої нецентрованої кодової послідовності 8 8 8 0 0 8 0 4 4 4 4 4 4 4.

На рисунку 2.2 показаний приклад розрахунку ентропії та кореляційних характеристик 7-бітного коду М-сигналу 1 1 1 0 0 1 0, який формується у вигляді восьмирівневої нецентрованої кодової послідовності 8 8 8 0 0 8 0.

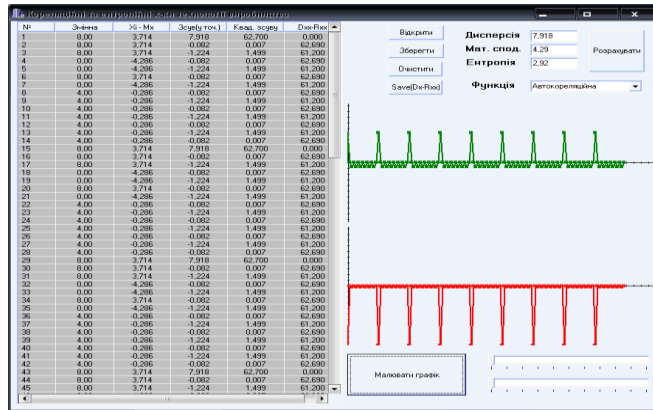


Рисунок 2.1 - Оцінка ентропії коду Баркера

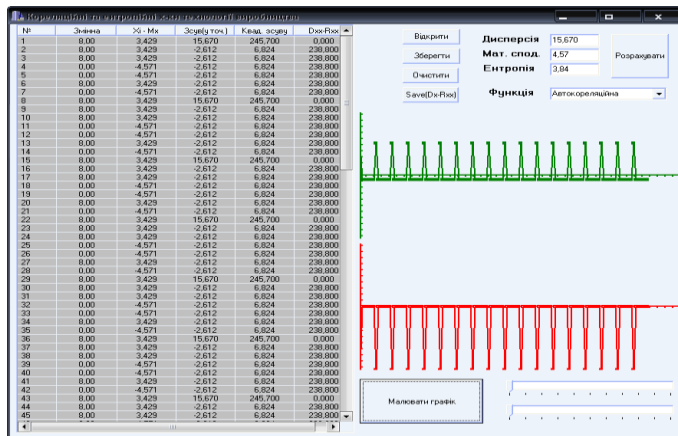


Рисунок 2.2 - Оцінка ентропії M-сигналу

Моделювання автокореляційних характеристик ДІ на основі двовимірних кодів Баркера дозволяє знайти найефективніші двовимірні ШПК та їх кореляційні функції, що дозволяє оцінити ефективність двовимірних ШПК в порівнянні з одновимірними з точки застосування ентропійного підходу.

На рисунку 2.3 приведена діаграма ентропій одновимірних та двовимірних ШПС.

З рисунка 2.3 видно, що двовимірні шумоподібні сигнали мають значно кращі ентропійні характеристики у порівнянні з одновимірними ШПС.

Значний вплив на кореляційні характеристики ШПК обумовлює поява певної кількості помилок, що значно погіршує ентропійні характеристики ШПС.

Для виявлення погіршення взаємокореляційних властивостей вибраних ШПК в досліджувану кодову послідовність, для якої розраховувалась взаємокореляційна функція, вводились однократні та багатократні помилки, які

полягали в інвертуванні одного чи кількох бітів коду. Оскільки досліджувані коди при інвертуванні певних бітів мало чутливі до цих змін, то з отриманих результатів вибирались ті, що приводять до найбільшого зниження ефективності кодової послідовності.

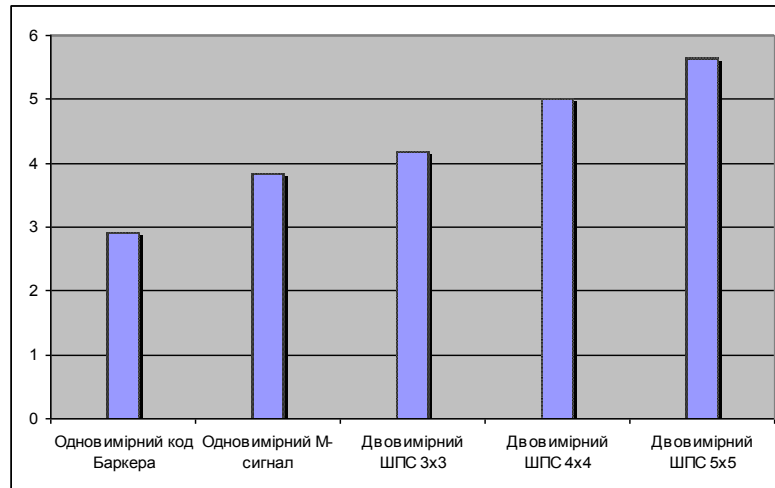


Рисунок 2.3 - Діаграма ентропій одновимірних та двовимірних ШПС

На рисунку 2.4 показана діаграма зміни ентропійних характеристик двовимірних та одновимірних ШПС в залежності від кількості введених або прийнятих помилок.

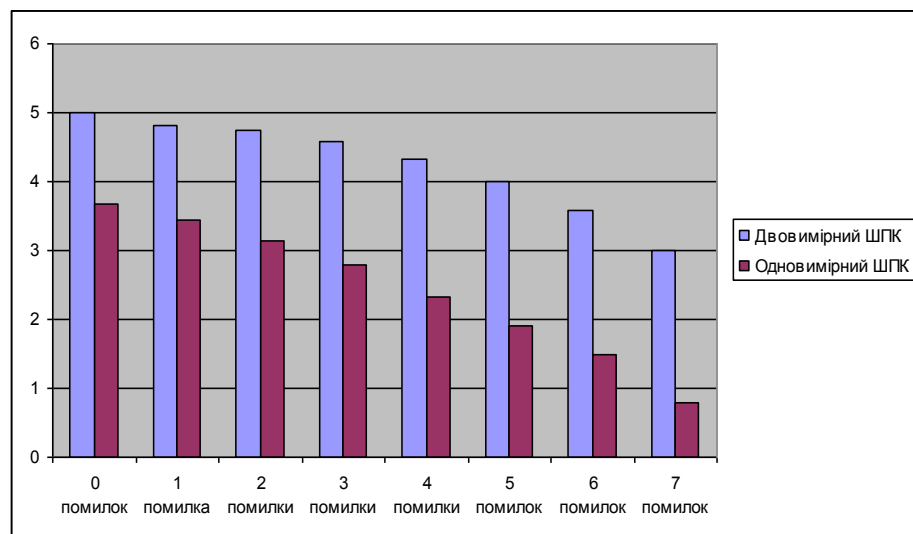


Рисунок 2.4 - Ентропія кореляційних функцій ШПК з помилками



Проведені дослідження дозволяють сумісно оцінити ентропійні характеристики різних типів ШПС, які можуть зустрічатися в різних каналах зв'язку на основі ентропійних властивостей. Двовимірні ШПС мають більшу ентропійні інформативність в порівнянні з одновимірними шумоподібними сигналами.

#### 2.4 Дослідження ентропійних характеристик аналітично заданих сигналів

Технологічні процеси переважної більшості промислових об'єктів найчастіше описуються сумою синусоїд сигналів з різними фазами та амплітудами згідно базису Фур'є і можуть характеризуватися різними статистичними функціями розподілу, в тому числі рівномірними, Гаусівськими, Релея та іншими:

$$x(t) = A_0 \cdot \sin(\omega t + \phi_0),$$

де  $A_0$  - початкова амплітуда сигналу;

$\omega$  - циклічна частота;

$t$  - час;

$\phi_0$  - початкова фаза сигналу.

При цьому загальна ентропія повинна дорівнювати сумі ентропій синусоїдального сигналу.

Оцінка ентропії окремої гармоніки синусоїдального сигналу представлена на рисунку 2.5. Результати розрахунку кореляційної оцінки ентропії приведені в таблиці 3.2.

При наявності двохпозиційного регулятора вихідні сигнали станів технологічних процесів наближаються до меандрових для базису Радемахера. Результати досліджень, графіки кореляційних характеристик та оцінка ентропії приведені на рисунку 2.6. Ці результати отримані на основі даних таблиці 2.3.

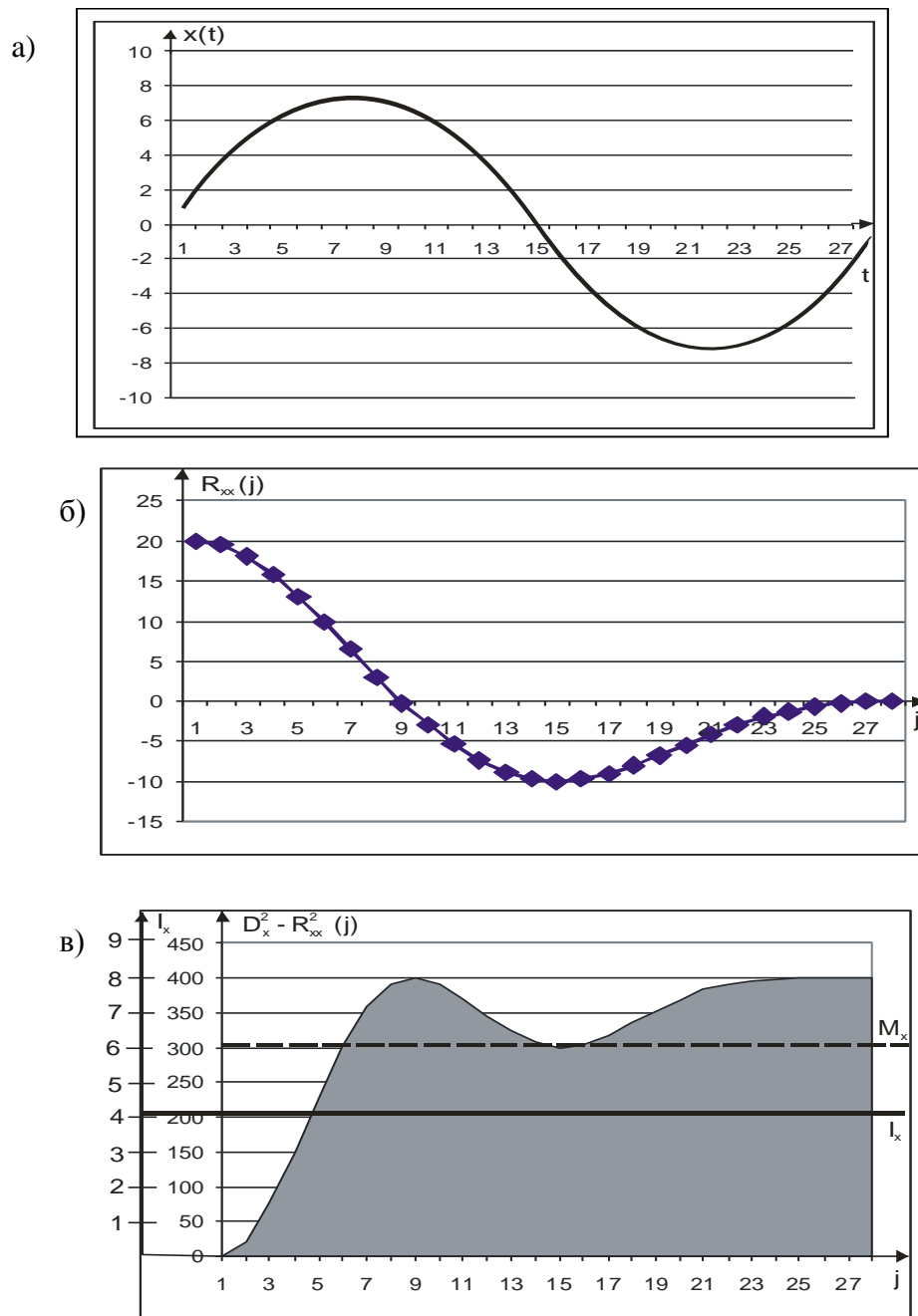


Рисунок 2.5 – Асимптотика синусоїдного сигналу: а) сигнал; б) кореляційна функція; в) оцінка ентропії

Таблиця 2.2 – Результати розрахунку кореляційної оцінки ентропії синусоїдального сигналу

$N$	$x_i$	$R_{xx}(j)$	$D_x^2 - R_{xx}^2(j)$
1	2	3	4
1	1	20	0
2	2	19,46	21,14
3	3	18	76
4	4	15,79	150,8

Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4
5	5	13	231
6	6	9,821	303,5
7	7	6,429	358,7
8	7	3	391
9	6	-0,214	400
10	5	-3,036	390,8
11	4	-5,429	370,5
12	3	-7,357	345,9
13	2	-8,786	322,8
14	1	-9,679	306,3
15	-1	-10	300
16	-2	-9,75	304,9
17	-3	-9,071	317,7
18	-4	-8,071	334,9
19	-5	-6,857	353
20	-6	-5,536	369,4
21	-7	-4,214	382,2
22	-7	-3	391
23	-6	-2	396
24	-5	-1,25	398,4
25	-4	-0,714	399,5
26	-3	-0,357	399,9
27	-2	-0,143	400
28	-1	-0,036	400

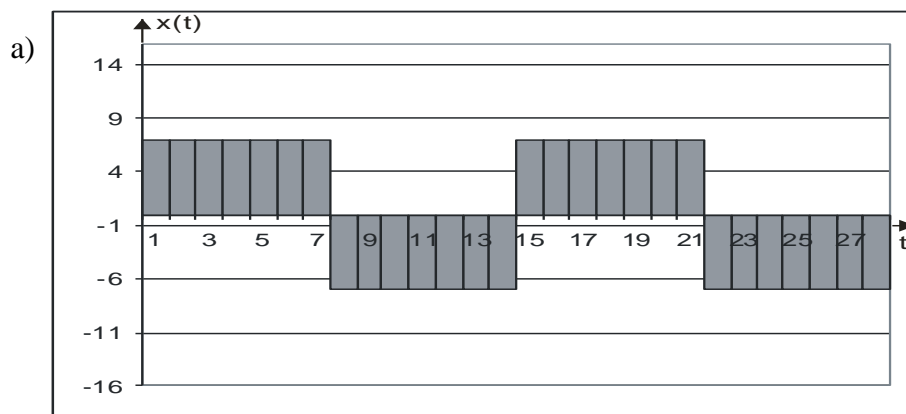


Рисунок 2.6 – Асимптотика меандрового сигналу: а) сигнал; б) кореляційна функція; в) оцінка ентропії

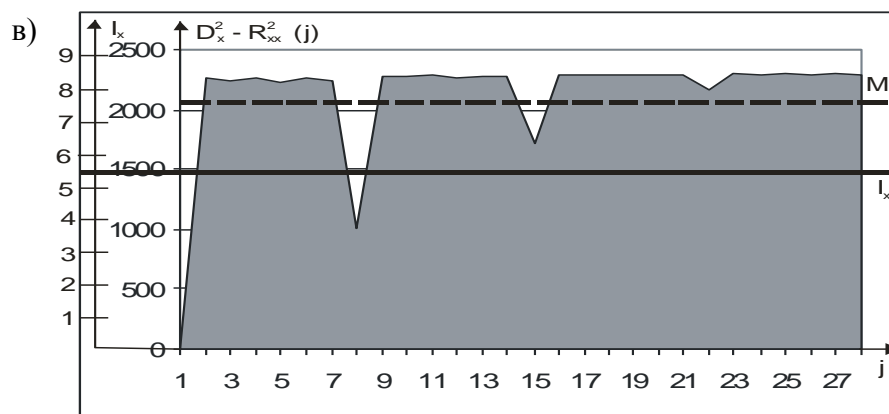
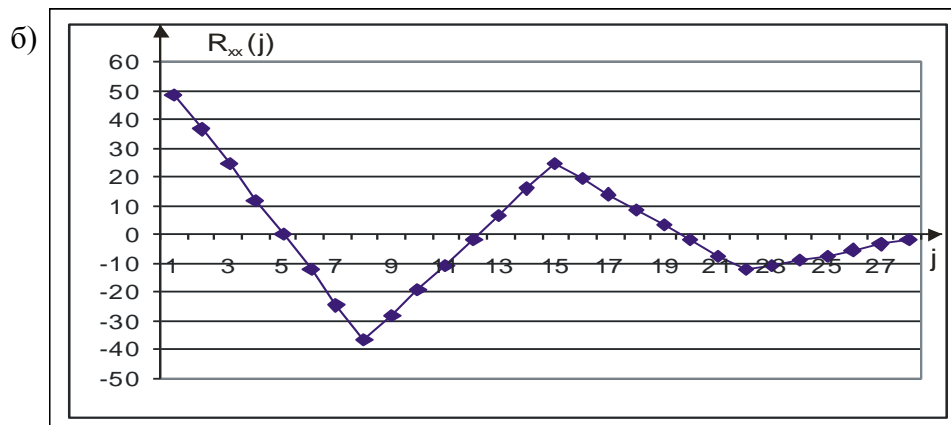


Рисунок 2.6 – Продовження

Таблиця 2.3 – Результати розрахунку кореляційної оцінки ентропії меандрового сигналу

$N$	$x_i$	$R_{xx}(j)$	$D_x^2 - R_{xx}^2(j)$
1	2	3	4
1	7	49	0
2	7	36,75	1050
3	7	24,5	1801
4	7	12,25	2251
5	7	0	2401
6	7	-12,25	2251
7	7	-24,5	1801
8	-7	-36,75	1050
9	-7	-28	1617
10	-7	-19,25	2030
11	-7	-10,5	2291
12	-7	-1,75	2398
13	-7	7	2352
14	-7	15,75	2153
15	7	24,5	1801
16	7	19,25	2030

Продовження таблиці 2.3

1	2	3	4
17	7	14	2205
18	7	8,75	2324
19	7	3,5	2389
20	7	-1,75	2398
21	7	-7	2352
22	-7	-12,25	2251
23	-7	-10,5	2291
24	-7	-8,75	2324
25	-7	-7	2352
26	-7	-5,25	2373
27	-7	-3,5	2389
28	-7	-1,75	2398

При застосуванні двохрівневого дискретного регулятора сигналів усі вихідні сигнали будуть представлятися у вигляді трапецеїдальних решітчастих функцій.

Отримані характеристики кореляційних та ентропійних оцінок, згідно даних таблиці 2.4, показані на рисунку 2.7.

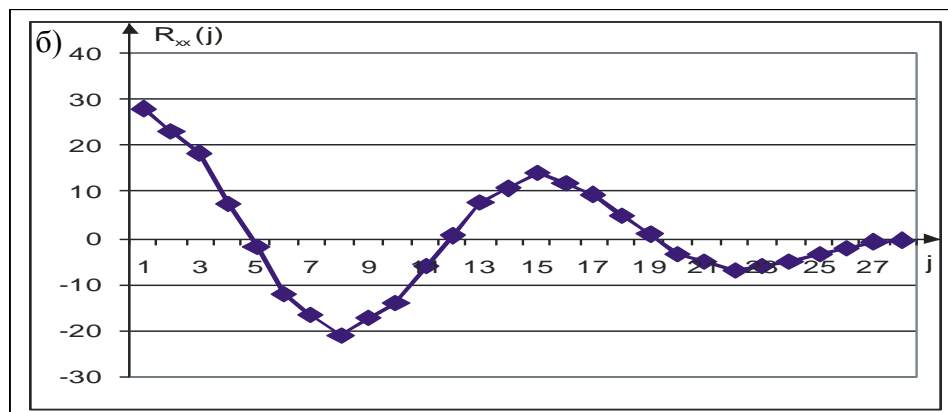
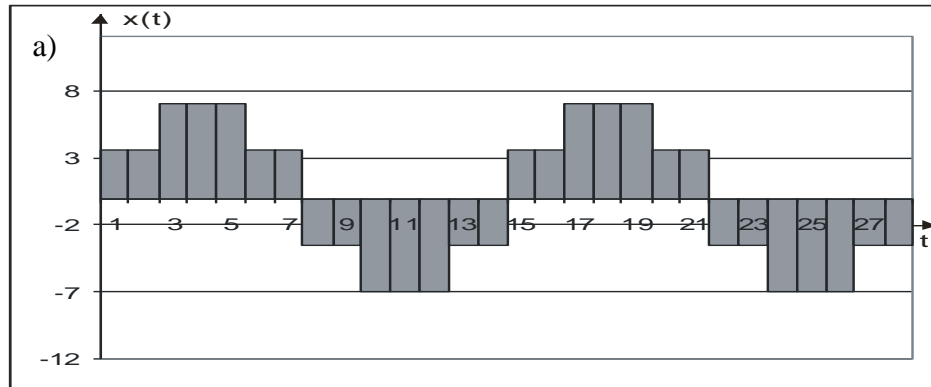


Рисунок 2.7 – Асимптотика трапецеїдального сигналу: а) сигнал; б) кореляційна функція; в) оцінка ентропії

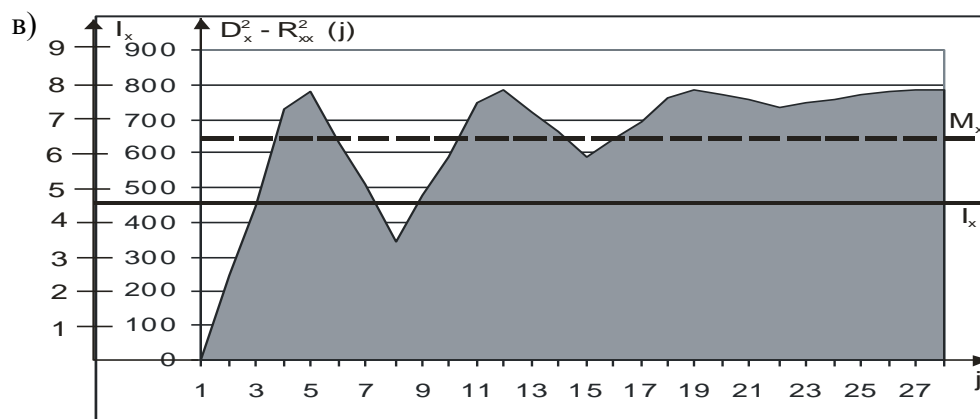


Рисунок 2.7 – Продовження

Таблиця 2.4 – Результати розрахунку оцінки ентропії трапецеїдального сигналу

$N$	$x_i$	$R_{xx}(j)$	$D_x^2 - R_{xx}^2(j)$
1	3,5	28	0
2	3,5	23,19	246,3
3	7	18,38	446,4
4	7	7,438	728,7
5	7	-1,75	780,9
6	3,5	-12,25	633,9
7	3,5	-16,63	507,6
8	-3,5	-21	343
9	-3,5	-17,5	477,8
10	-7	-14	588
11	-7	-6,125	746,5
12	-7	0,438	783,8
13	-3,5	7,875	722
14	-3,5	10,94	664,4
15	3,5	14	588
16	3,5	11,81	644,5
17	7	9,625	691,4
18	7	4,813	760,8
19	7	0,875	783,2
20	3,5	-3,5	771,8
21	3,5	-5,25	756,4
22	-3,5	-7	735
23	-3,5	-6,125	746,5
24	-7	-5,25	756,4
25	-7	-3,5	771,8
26	-7	-2,188	779,2
27	-3,5	-0,875	783,2
28	-3,5	-0,438	783,8

При застосуванні підрегуляторів сигналів усі вихідні сигнали повинні описуватися відповідними трикутними функціями. Їх кореляційні, а також ентропійні характеристики представлені на рисунку 2.8 згідно отриманих результатів, які наведені у таблиці 2.5.

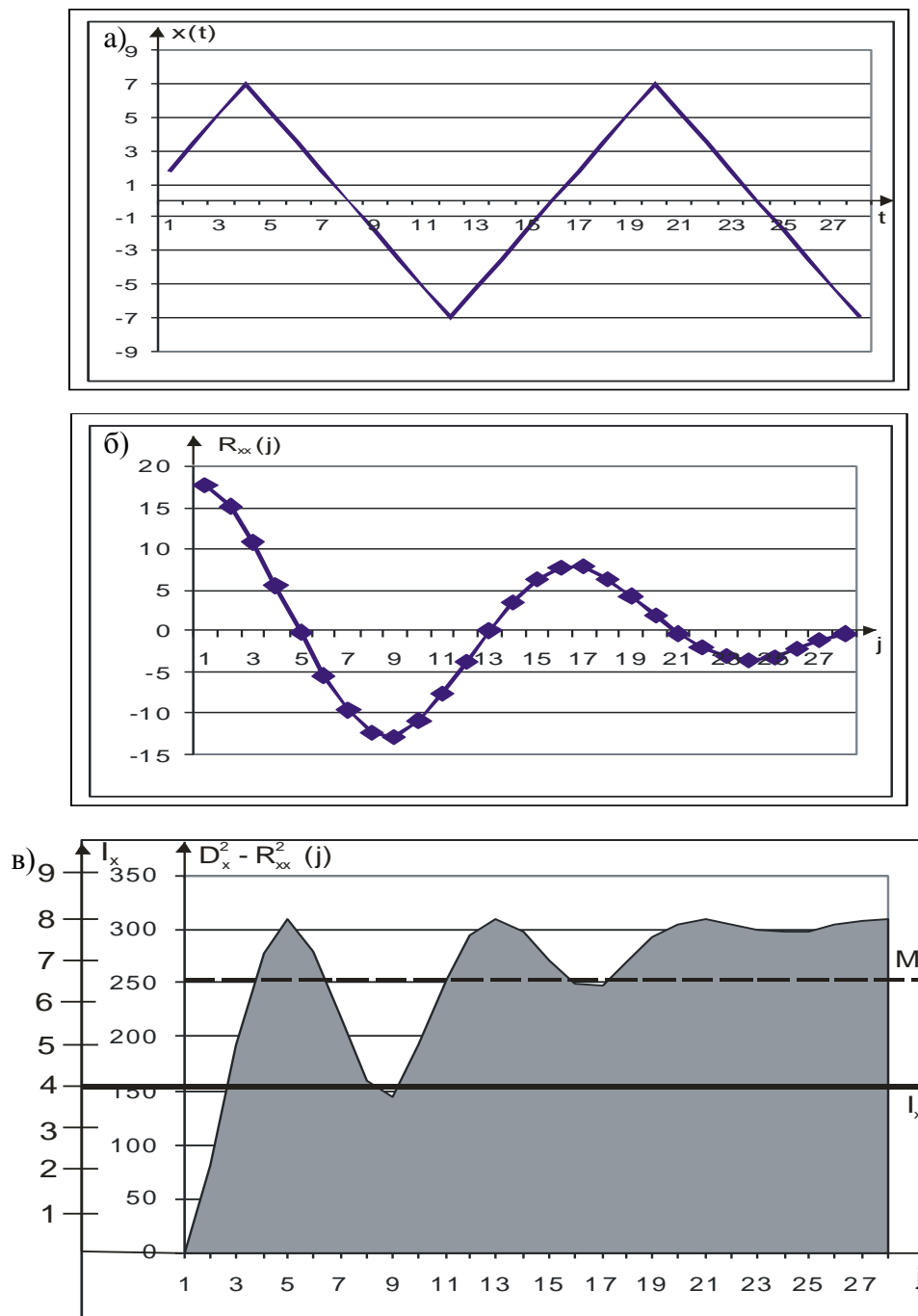


Рисунок 2.8 – Асимптотика трикутного сигналу: а) сигнал; б) кореляційна функція; в) оцінка ентропії

Таблиця 2.5 – Результати розрахунку оцінки ентропії трикутного сигналу

N	$x_i$	$R_{xx}(j)$	$D_x^2 - R_{xx}^2$
1	2	3	4
1	1,75	17,58	0
2	3,5	15,1	81,08
3	5,25	10,8	192,3
4	7	5,461	279,2
5	5,25	-0,161	309
6	3,5	-5,345	280,4
7	1,75	-9,546	217,9
8	0	-12,21	159,8
9	-1,75	-12,81	145
10	-3,5	-10,77	193
11	-5,25	-7,581	251,5
12	-7	-3,782	294,7
13	-5,25	0,08	309
14	-3,5	3,505	296,7
15	-1,75	6,164	271
16	0	7,729	249,2
17	1,75	7,873	247
18	3,5	6,266	269,7
19	5,25	4,16	291,7
20	7	1,881	305,5
21	5,25	-0,241	308,9
22	3,5	-1,926	305,3
23	1,75	-3,064	299,6
24	0	-3,545	296,4
25	-1,75	-3,261	298,4
26	-3,5	-2,102	304,6
27	-5,25	-1,099	307,8
28	-7	-0,362	308,9

При застосуванні нелінійних регуляторів сигналів (зокрема, в авіаційній промисловості, а також в ракетобудуванні), вихідні сигнали мають вигляд пилкоподібних функцій. Дослідження на основі таблиці 2.6 їх результатів, приведені на рисунку 2.9.



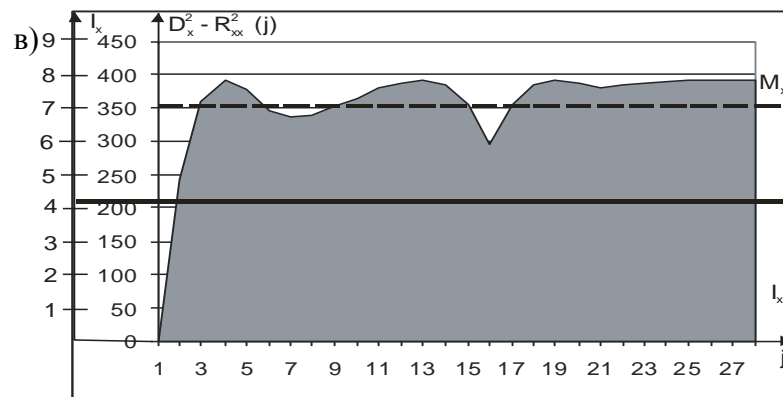
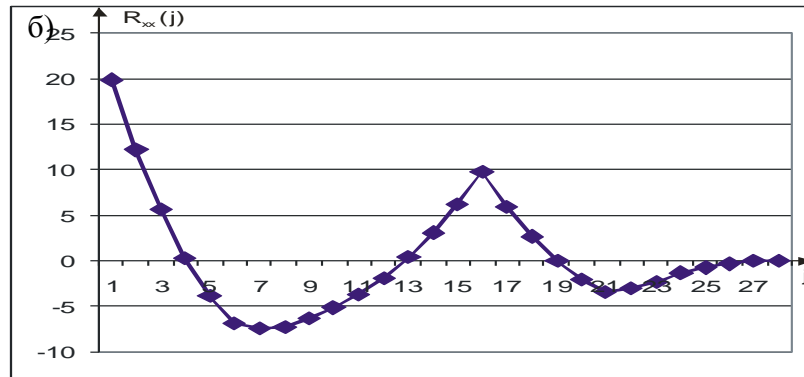
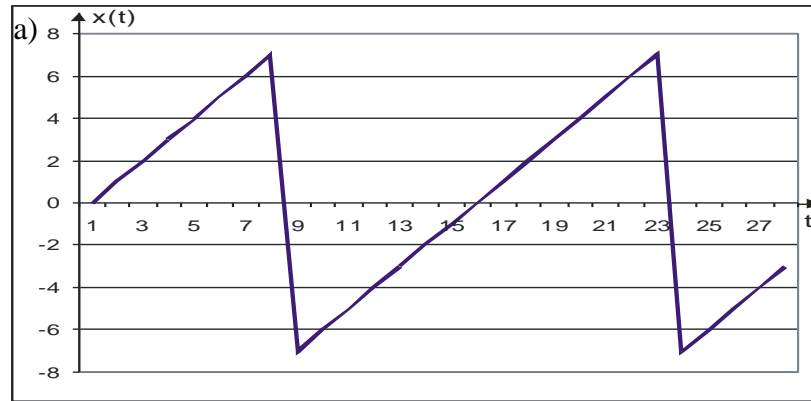


Рисунок 2.9 – Асимптотика пилкоподібного сигналу: а) сигнал; б) кореляційна функція; в) оцінка ентропії

Таблиця 2.6 – Результати розрахунку оцінки ентропії пилкоподібного сигналу

$N$	$x_i$	$R_{xx}(j)$	$D_x^2 - R_{xx}^2(j)$
1	2	3	4
1	0	19,81	0
2	1	12,19	243,8
3	2	5,679	360,2
4	3	0,31	392,3
5	4	-3,88	377,4
6	5	-6,857	345,4

Продовження таблиці 2.6

1	2	3	4
7	6	-7,454	336,9
8	7	-7,301	339,1
9	-7	-6,363	351,9
10	-6	-5,196	365,4
11	-5	-3,708	378,7
12	-4	-1,863	389
13	-3	0,375	392,3
14	-2	3,042	383,2
15	-1	6,173	354,3
16	0	9,804	296,3
17	1	5,935	357,2
18	2	2,637	385,5
19	3	-0,053	392,4
20	4	-2,101	388
21	5	-3,47	380,4
22	6	-2,996	383,5
23	7	-2,307	387,1
24	-7	-1,369	390,6
25	-6	-0,738	391,9
26	-5	-0,321	392,3
27	-4	-0,083	392,4
28	-3	0,012	392,4

Аналітично заданими можуть бути також шумоподібні сигнали типу  $m$ -послідовності, коду Баркера та інші, які, як правило, описуються Пуассонівськими законами розподілу і характеризуються особливими кореляційними властивостями, які широко використовуються в телекомунікаційних системах та комп'ютерних мережах для захисту інформації від несанкціонованого доступу, а також від помилок або мультиплікативних завад.

Результати дослідження ентропійних сигналів згідно таблиці 2.7 представлена на рисунку 2.10.

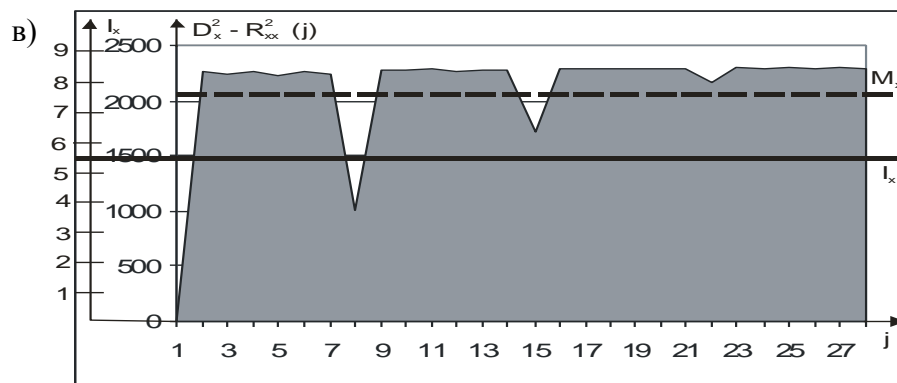
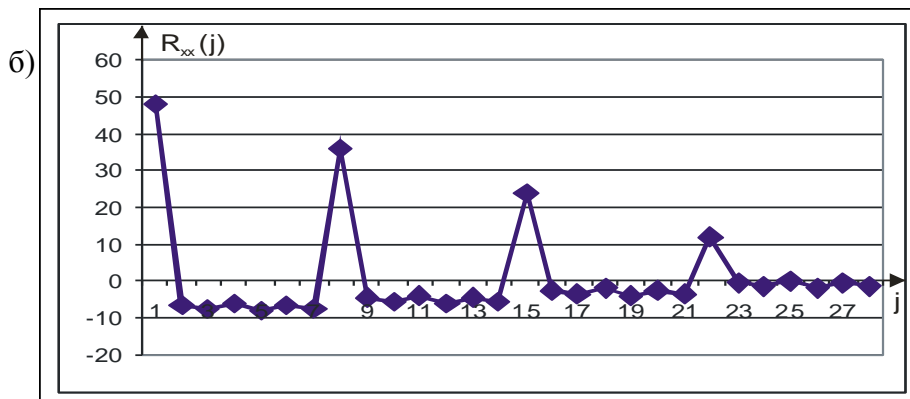
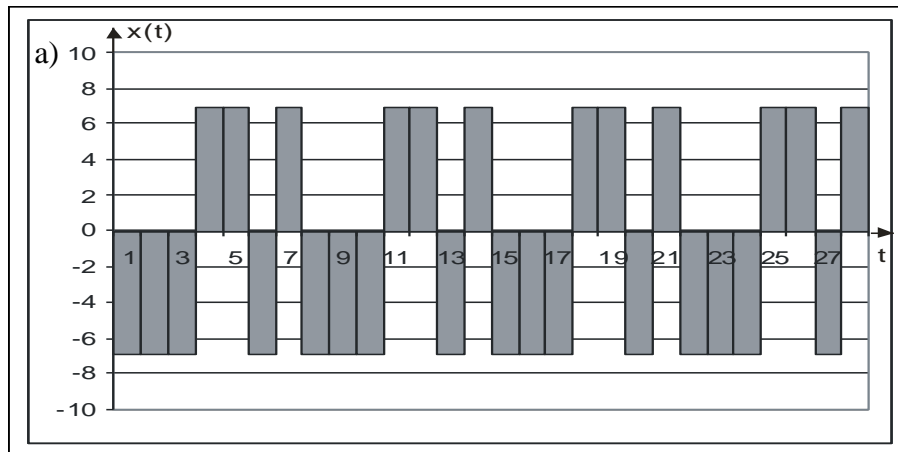


Рисунок 2.10 – Асимптотика М-сигналу: а) сигнал; б) кореляційна функція; в) оцінка ентропії

Таблиця 2.7 – Результати розрахунку оцінки ентропії М-сигналу

$N$	$x_i$	$R_{xx}(j)$	$D_x^2 - R_{xx}^2(j)$
1	2	3	4
1	-7	48	0
2	-7	-6,286	2264
3	-7	-7,571	2247
4	7	-5,857	2270
5	7	-8,143	2238
6	-7	-6,429	2263
7	7	-7,714	2244

Продовження таблиці 2.7

1	2	3	4
8	-7	36	1008
9	-7	-4,286	2286
10	-7	-5,571	2273
11	7	-3,857	2289
12	7	-6,143	2266
13	-7	-4,429	2284
14	7	-5,714	2271
15	-7	24	1728
16	-7	-2,286	2299
17	-7	-3,571	2291
18	7	-1,857	2301
19	7	-4,143	2287
20	-7	-2,429	2298
21	7	-3,714	2290
22	-7	12	2160
23	-7	-0,286	2304
24	-7	-1,571	2302
25	7	0,143	2304
26	7	-2,143	2299
27	-7	-0,429	2304
28	7	-1,714	2301

Кореляційні та ентропійні характеристики коду Баркера згідно таблиці 2.8 представлені на рисунку 2.10.

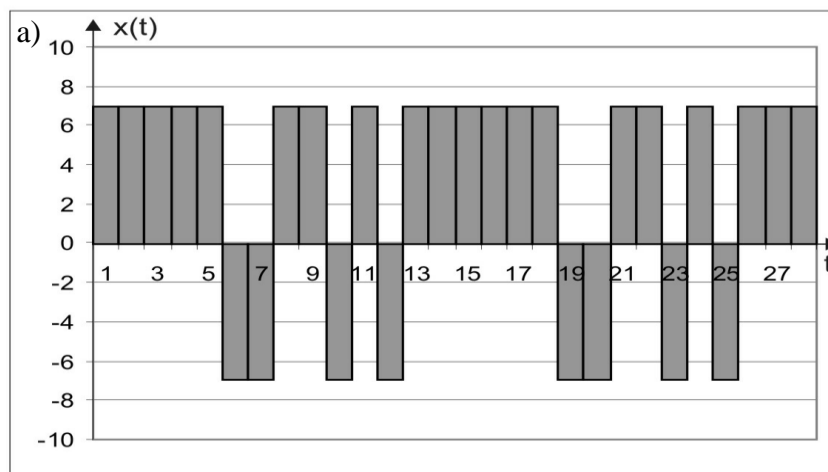


Рисунок 2.10 – Асимптотика сигналу коду Баркера: а) сигнал; б) кореляційна функція; в) оцінка ентропії

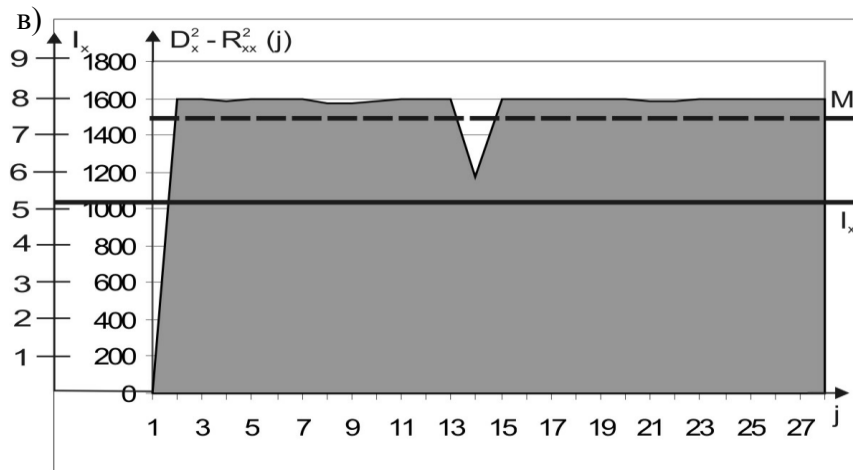
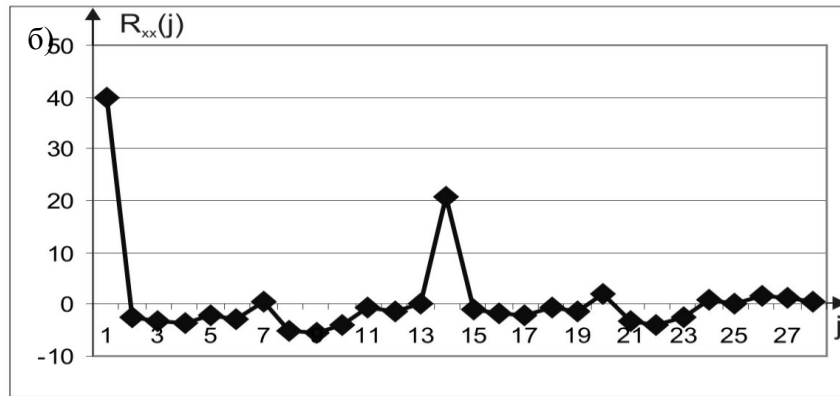


Рисунок 2.10 – Продовження

Таблиця 2.7 – Результати розрахунку оцінки ентропії сигналу коду Баркера

$N$	$x_i$	$R_{xx}(j)$	$D_x^2 - R_{xx}^2(j)$
1	2	3	4
1	7	40	0
2	7	-2,571	1593
3	7	-3,143	1590
4	7	-3,714	1586
5	7	-2,286	1595
6	-7	-2,857	1592
7	-7	0,571	1600
8	7	-5	1575
9	7	-5,571	1569
10	-7	-4,143	1583
11	7	-0,714	1599
12	-7	-1,286	1598
13	7	0,143	1600
14	7	20,57	1177
15	7	-1	1599
16	7	-1,571	1598
17	7	-2,143	1595

Продовження таблиці 2.7

1	2	3	4
18	7	-0,714	1599
19	-7	-1,286	1598
20	-7	2,143	1595
21	7	-3,429	1588
22	7	-4	1584
23	-7	-2,571	1593
24	7	0,857	1599
25	-7	0,286	1600
26	7	1,714	1597
27	7	1,143	1599
28	7	0,571	1600

Проведені дослідження дозволяють сумісно оцінити ентропійні характеристики різних типів сигналів та їх комбінацій, які можуть зустрічатися на практиці при діагностуванні станів промислових ОУ на основі ентропійних властивостей.

На рисунку 2.11 показана діаграма ентропії аналітично заданих сигналів.

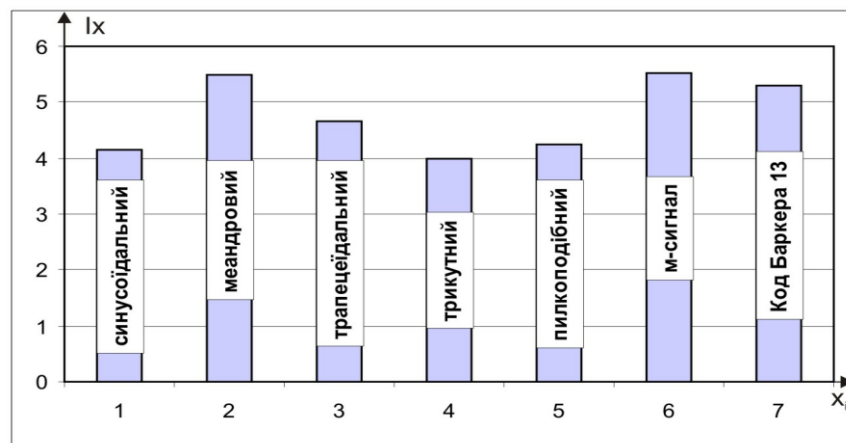


Рисунок 2.11 - Ентропія аналітично заданих сигналів

З рисунка 2.11 видно, що найбільшою ентропійною інформативністю характеризуються меандрові, шумоподібні сигнали типу послідовності максимальної довжини (М-сигнали), а також шумоподібні сигнали типу коду Баркера.

Отримані оцінки дають можливість розрахувати ентропію суми сигналів на основі формули  $I_x = \sum_{i=1}^n Ix_i$ , де  $I_x$ - ентропія аналітично заданого сигналу. Сума сигналів з Гаусівським розподілом, який найчастіше відповідає промисловим ОУ, теоретично повинна наближатися до оцінки Зδ.

## Висновки до розділу 2

1. Досліджені ентропійні характеристики та отримані аналітичні вирази оцінок ентропії, що дозволило визначити характеристики зростання ентропії обумовлені ефектами кореляційного підсилення сигналів.

2. Систематизовані статистичні характеристики джерел інформації та їх спектральні моделі на основі оцінок вибіркового, ковзного та вагового математичних сподівань, вибірових, ковзних дисперсій та середньоквадратичного відхилення, в результаті отримані аналітичні вирази визначення ентропії згідно інформаційної міри Р. Хартлі, що дозволило побудувати їх порівняльну діаграму по відношенню до сигнальної моделі.

3. Досліджені ентропійні характеристики аналітично заданих сигналів, в результаті якого встановлено, що найвищими оцінками ентропії характеризуються послідовності максимальної довжини, одновимірні та двовимірні коди Баркера.

4. Досліджені та систематизовані кореляційні функції, що дозволило обґрунтувати застосування функції еквівалентності для визначення кореляційної міри ентропії джерел інформації.

### 3 ПОБУДОВА ЕНТРОПІЙНОЇ МОДЕЛІ КВАЗІСТАЦІОНАРНОГО ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ

#### 3.1 Характеристики квазістаціонарних джерел інформації

При створенні, адаптованих та проблемно-орієнтованих до задач реальних промислових об'єктів широко використовуються методи інформаційного опису технологічних установок як ДІ. При цьому у загальному випадку стан ДІ достатньо повно описується функціоналом:

$$X_{ДІ} = F(M_x, D_x, \delta_x, R_{xx}, R_{xy}, S_\omega, I_x), \quad (3.1)$$

де  $M_x$  - математичне сподівання;

$D_x$  - дисперсія;

$\delta_x$  - середньоквадратичне відхилення;

$R_{xx}$  - функція автокореляції;

$R_{xy}$  - функція або матриця взаємкореляції;

$S_\omega$  - спектр;

$I_x$  - ентропія.

Найбільш загальним класом ДІ, які відповідають технологічним об'єктам є квазістаціонарні (КС) ДІ [25, 26], в яких один або декілька параметрів виразу (3.1) змінюється стрибкоподібно, що показано на рисунку 3.1.

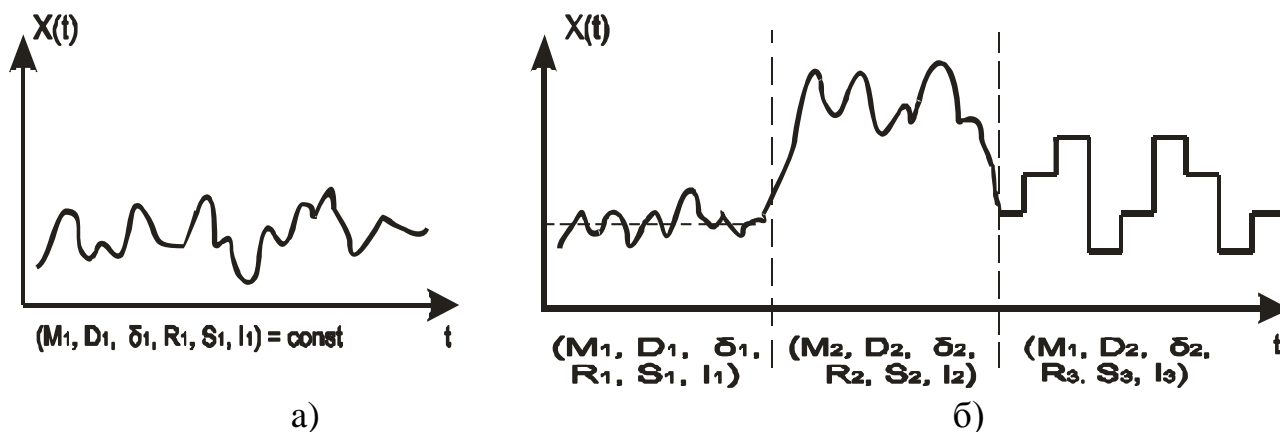


Рисунок 3.1 - Реалізації стаціонарного(а) та квазістаціонарного(б) ДІ



З рисунка 1б) видно, що КС ДІ характеризується трьома станами, причому в другому стані стрибкоподібно змінюються параметри  $M_x, R_{xx}, S_{\omega}, I_x$ , а в третьому стані відповідно змінюються параметри  $R_{xx}, S_{\omega}, I_x$ .

Таким чином, для вирішення задач інформаційного опису та ідентифікації квазістаціонарного ДІ, функціонал ДІ необхідно розширити ознакою стану КС ДІ в наступному виді:

$$X_{КС ДІ} = F(Z_k, M_{xk}, D_{xk}, \delta_{xk}, R_{xxk}, R_{xyk}, S_{\omega k}, I_{xk}), \quad (3.2)$$

де  $Z_k$  - номер стану КС ДІ.

Функціонал (3.2) у загальному випадку дозволяє описати реалізацію станів КС ДІ на певному інтервалі часу. В результаті характеристики квазістаціонарного ДІ можуть бути описані у вигляді стрибкоподібних змін характеристичних параметрів, які представлені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Матриця станів КС ДІ

$Z_k$	1	2	3	4	5	6	1	2	7	
$M_x$	1	1	1	2	2	3	1	1	4	$M_x = \lfloor \div 4 \rfloor$
$D_x$	1	2	3	2	2	1	1	2	4	$D_x = \lfloor \div 6 \rfloor$
$\delta_x$	1	5	2	3	2	3	1	5	5	$\delta_x = \lfloor \div 6 \rfloor$
$R_{xx}$	1	1	2	1	2	2	1	1	2	$R_{xx} = \lfloor \div 2 \rfloor$
$S_{\omega}$	2	2	1	1	2	2	2	2	1	$S_{\omega} = \lfloor \div 2 \rfloor$
$I_x$	1	2	3	4	5	6	1	2	7	$I_x = \lfloor \div 8 \rfloor$

При довготривалому спостереженні за станами КС ДІ і накопиченні достатнього об'єму вибірки на основі таблиці 3.1 розраховуються матриці імовірності переходів КС ДІ з одного стану в інший по кожному характеристичному параметру, наступним чином:  $\|P_{ij}^{M_x}\|$ ,  $\|P_{ij}^{D_x}\|$ ,  $\|P_{ij}^{\delta_x}\|$ ,  $\|P_{ij}^{R_{xx}}\|$ ,  $\|P_{ij}^{S_{\omega}}\|$ ,  $\|P_{ij}^{I_x}\|$ .

Очевидно, що матриці  $P_{ij} \langle \mathbf{Q}_x \rangle = P_{ij} \langle \mathbf{G}_x \rangle$ ,  $P_{ij} \langle \mathbf{R}_{xx} \rangle = P_{ij} \langle \mathbf{S}_\omega \rangle$ , а матриця ентропійних станів  $P_{ij} \langle \mathbf{C}_x \rangle$  буде найбільш повно та інтегрально описувати стани КС ДІ у зв'язку з тим, що ентропія станів КС ДІ описується характеристичним функціоналом наступного типу:

$$I_x = F \langle \mathbf{Q}_x, \mathbf{R}_{xx} \rangle, \quad (3.3)$$

які розраховуються згідно кореляційної міри ентропії на основі виразу

$$I_x = n \cdot \hat{E} \left[ \frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \langle \mathbf{Q}_x^2 - R_{xx} \langle \mathbf{C} \rangle \rangle \right], \quad (3.4)$$

$$\text{де } D_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \langle \mathbf{C}_i - M_x \rangle^2;$$

$$M_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i;$$

$\hat{E} \langle \dots \rangle$  - цілочисельна функція з округленням до більшого цілого.

Таким чином, аналіз станів КС ДІ на основі оцінки ентропії дозволяє перевести вирішення задачі з багатомірного простору в одномірний, що демонструє рисунок 3.2.

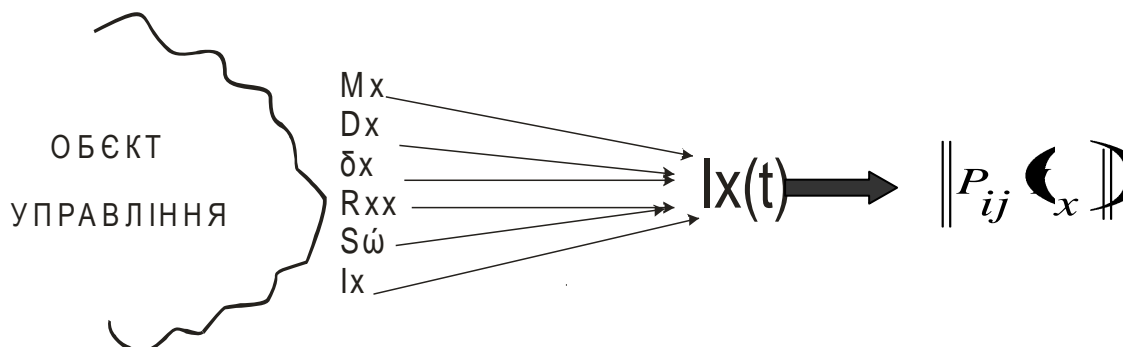


Рисунок 3.2 - Граф ідентифікації станів КС ДІ в багатомірному та одномірному просторах

На рисунку 3.3 показаний приклад реалізації ентропійних станів КС ДІ згідно матриці станів КС ДІ (див. таблицю 3.1.), де  $t_{i+1} - t_i$  - часові інтервали квазістаціонарних станів джерел інформації за інтегральною оцінкою ентропії.

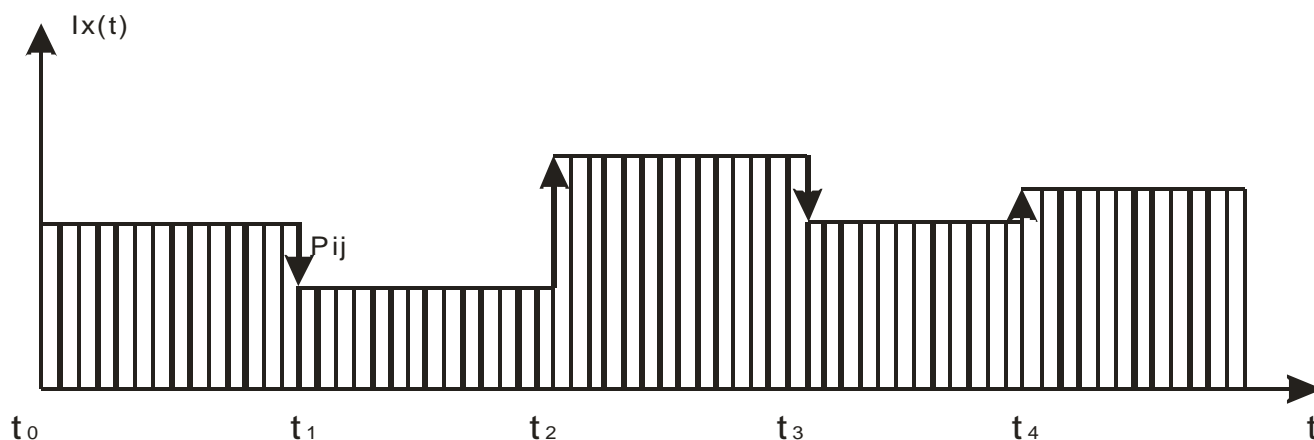


Рисунок 3.3 - Реалізація ентропійних станів КС ДІ

### 3.2 Дослідження швидкості створення повідомлення розподіленої комп'ютерної системи

Нехай комп'ютерна система реального часу обслуговує  $k$ -об'єктів управління, кожен з яких оснащений  $m$ -сенсорами, які обслуговуються однотипними  $k$ -каналними контролерами низової мережі. Причому традиційна уніфікованість системних характеристик вихідних сигналів сенсорів, числа каналів низової комп'ютерної мережі в яких використовуються означені аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) однакової розрядності з однаковим інтервалом дискретизації по часу та інтервалом дискретизації по амплітуді, швидкість створення повідомлень, які поступають на рівень цехових (SP) та адміністративних (AP) процесорів, розраховується згідно виразу

$$V_{OY} = \frac{I_{OY}}{T} = \frac{m \cdot \hat{E} \log_2 A_0^-}{\Delta t_0}, \quad (3.5)$$

де  $V_{OY}$  – швидкість створення повідомлення;

$A_0, \Delta t_0$  – відповідно уніфіковані діапазон квантування вихідних сигналів сенсорів та крок дискретизації і відбору інформації в часі, причому для забезпечення необхідної точності подання сигналів будь-якого сенсора даного об'єкта управління та врахування умов необхідної частоти дискретизації одного з найбільш динамічного, уніфіковані значення  $A_0$  та  $\Delta t_0$  вибираються згідно умов  $A_0 \geq A_{0max}$ ;  $\Delta t_0 \leq \Delta t_{jmin}$ .

Таким чином враховуючи оцінку ентропії, багаторівневого і багатоканального джерела інформації згідно оцінки (3.5) можна записати  $I_{OY}^* < I_j < I_0$ , тобто  $V_{OY}^* < V_j < V_0$ , де  $I_{OY}^*$  – власна ентропія об'єкта управління;  $I_j$  – ентропія об'єкта управління з врахуванням різних діапазонів квантування сенсорів;  $I_0$  – максимальний об'єм оцінки ентропії ДІ як об'єктів управління, які не враховують статистичні характеристики та використовують мінімаксні параметри  $A_{0max} - t_{0min}$  квантування та дискретизації уніфікованих аналого-цифрових перетворювачів.

Об'єм інформаційних потоків можна зменшити не тільки з врахуванням діапазону квантування, але і шляхом вибору величини кроку дискретизації  $\Delta t_j$  відповідно до динаміки вихідних сигналів  $j$ -го сенсора, що показано на рисунку 3.4.

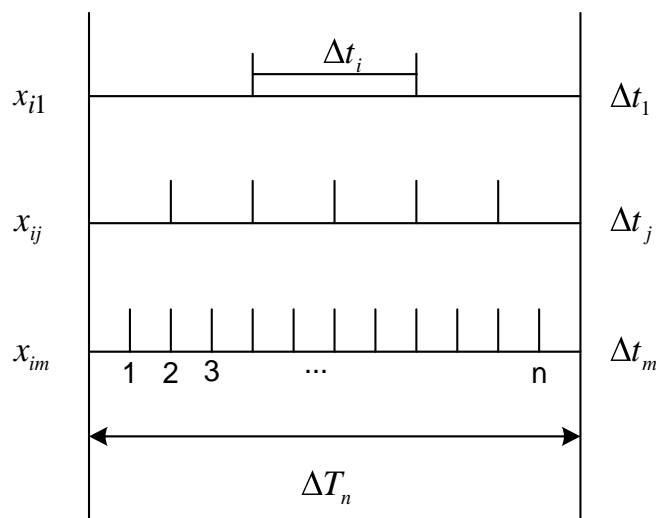


Рисунок 3.5 - Характеристики адаптації параметрів АЦП до динаміки вихідних сигналів сенсорів багаторівневого багатоканального джерела інформації

Таким чином, у загальному випадку на інтервалі часу формується  $n_i \dots n_j \dots n_k$  числових значень відліків  $x_{ij}$  діагностування станів об'єкта управління  $\Delta T_n$ , де  $n$  – об'єм масиву даних  $x_i$ , який формується найбільш динамічним параметром  $x_{ij}$ , звідки об'єм інформації  $\Delta T_n$  розраховується згідно такого виразу:

$$I_j = \sum_{j=1}^m n_j \cdot \hat{E} \left[ \log_2 \cdot A_j \right] \quad (3.6)$$

Викладені оцінки ентропії для  $m$ -канальних об'єктів управління, які розраховуються згідно виразів (3.5 – 3.6) відповідають визначенню ентропії стаціонарних об'єктів управління.

У випадку квазістаціонарних властивостей об'єкта управління в різних  $s$ -станах може відбуватися зміна числа та ансамблю контрольованих параметрів, що призводить до зміни діапазону квантування та параметрів дискретизації, що показано на рисунку 3.6.

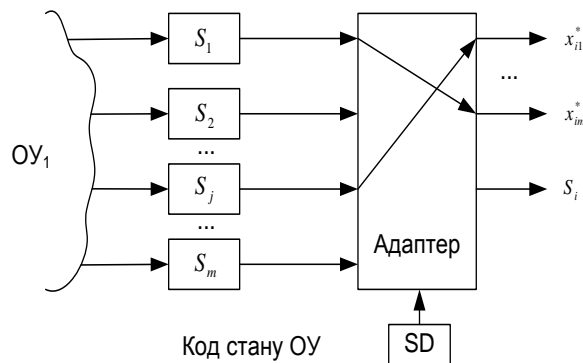


Рисунок 3.6 - Структура низового рівня інформаційної системи контролю квазістаціонарного ОУ, оснащеного адаптером його станів  $S_i$

Згідно рисунка 3.6, функціями адаптера є комутація сенсорів та формування їх ансамблю відповідно до коду їх стану  $S_i$ , а також відповідна зміна параметрів дискретизації з метою зменшення надлишковості інформації та наближення ентропії вихідних інформаційних потоків до власної ентропії ДІ. Досвід розробки

та експлуатації таких систем для контролю об'єктів нафтогазового комплексу, показує, що при застосуванні таких структур низових рівнів комп'ютерних систем досягається зменшення об'єму інформаційних потоків не більш ніж на 1-2 порядки.

При реалізації РКС на основі вертикальної інтегрально-імпульсної технології та застосування на низовому рівні інтегрально-імпульсних перетворювачів (ІП) теоретико-числового базису Галуа, вихідні сигнали сенсорів інтегруються і перетворюються на виході ІП в біт-орієнтовані потоки широтно-маніпульованих імпульсів кодів поля Галуа, що приводить до суттєвого зменшення об'ємів інформаційних потоків, які передаються на серверні системи вказаної структури. Розрахунок ентропії таких інформаційних потоків повинен виконуватися на основі виразу

$$I = G_i \cdot m \cdot n \cdot k, \quad G_i \in \overline{0,1}. \quad (3.7)$$

З виразу (3.7) видно, що коефіцієнт зменшення інформаційного потоку при використанні ІП залежить від розрядності використовуваних АЦП ( $k$ ) і може пропорційно зменшуватися в 8-10 разів стосовно дистрибутивних систем контролю технологічних об'єктів.

В окремому випадку в інформаційних системах обліку витрати енергоносіїв, де розрядність аналого-цифрових перетворювачів електромеханічних та електричних лічильників електроспоживання складає 20 біт, а цифрових кодів лічильників витрати газу, пари та води складає 24-32біт, що відповідає коефіцієнту зменшення інформації в межах 24-32 біт.

При реалізації низових рівнів РКС з використанням методів кодування інформаційних потоків у базисі Крестенсона, які видно з рисунка 3.2, сигнали сенсорів одночасно перетворюються в коди унітарного теоретико-числового-базису багатоканального АЦП, які кодуються в кожному каналі на основі нелінійної інформаційної технології методу залишків, а в додаткових двох каналах відповідно формуються алфавітно-цифрові коди, які вводяться оператором за допомогою абонентського пункту та додаткового каналу захисту від помилок в якому формується код залишку "0". Сформований таким чином потік даних в процесорі

системи залишкових класів перетворюється в двійковий код базису Радемахера-Крестенсона, який передається в сервери вищих рівнів інформаційної системи. При цьому зменшення ентропії інформаційних потоків при способі кодування в базисі Крестенсона, з захистом структуризованих даних від помилок не перевищує одного порядку.

В інформаційних системах, оснащених ентропійними спецпроцесорами, об'єми інформаційних потоків та відповідно швидкість створення повідомлення у порівнянні з  $m$ -канальною уніфікованою дистрибутивною системою пропорційна числу застосованих ентропійних процесорів і розраховується згідно виразу  $I_{EП} = k$ , що у порівнянні з ентропією необхідних даних для формування інформаційного потоку у складі:

- масиву даних  $x_i, i \in \overline{1, n}$ , ентропія якого рівна  $\hat{E} \left[ \log_2 A_0 \right]$ ;
- масиву даних інформаційних моделей  $M_x, D_x$ , сумарна ентропія яких рівна  $A_0$ , оскільки  $M_{x_{max}} = A/2$  і при  $D_{x_{max}} = A/2$ ;
- ентропія цифрових даних кореляційної моделі  $I_R = n_1 \cdot \hat{E} \left[ \log_2 A_0 \right]$ , де  $n_1$  – число точок кореляційної функції на інтервалі вибірки  $n$ .

Тобто при об'ємі даних уніфікованої дистрибутивної системи з відповідною структурою і використання названих моделей  $M_x, D_x, R_{xx}$  обчислено згідно виразу  $I = n \cdot m \cdot k + 2 + (n_1 \cdot k)$ , та об'ємі даних, які формуються на виході ентропійних спецпроцесорів отримаємо наступний коефіцієнт зменшення об'єму інформації

$$K_{EП} = \frac{n \cdot m \cdot k + 2 + (n_1 \cdot k)}{j \cdot k}, 1 \leq j \leq m.$$

Крім того, що при застосуванні ентропійних спецпроцесорів на низовому рівні комп'ютерної системи зменшує об'єм інформаційних потоків, як це показано на рисунку 3.7, та за рахунок розпаралелювання процесів опрацювання інформації та визначення оцінок кореляційної міри ентропії по кожному каналі багатоканального об'єкта управління. Значно зростає реакція системи на відхилення ентропійних характеристик від норми, зростає ефективність виявлення передаварійних та аварійних ситуацій на об'єктах управління, що в кінцевому

результаті призводить до зменшення економічних збитків, які обумовлені неякісним виконанням технологічних процесів, пошкодженням обладнання та іншим.

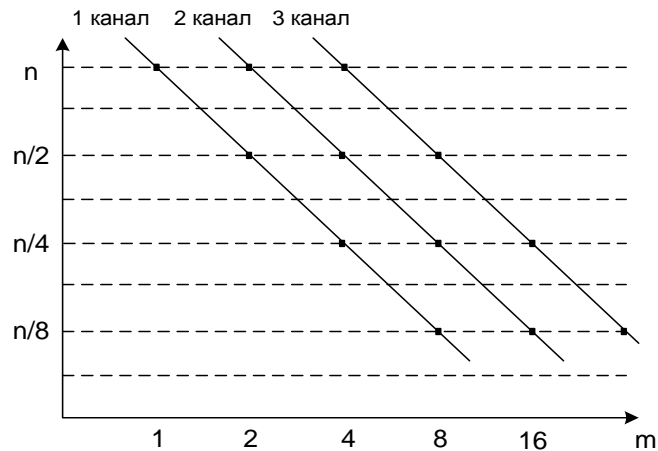


Рисунок 3.7 - Графік залежності інформаційних потоків від кількості каналів ентропійних спецпроцесорів

Запропонована структура РКС відрізняється від відомих існуючих архітектур інформаційних систем додатковим включенням на низовому рівні ентропійних спецпроцесорів, які виконують функції інтегрованої діагностики об'єктів управління по важливих статичних оцінках з врахуванням ряду важливих моделей математичного сподівання  $M_x$ , дисперсії  $D_x$ , середньоквадратичного відхилення  $\delta_x$  та одну із автокореляційних функцій  $R_{xx}$ .

Потік даних в процесорі системи залишкових класів перетворюється в двійковий код базису Радемахера-Крестенсона, який передається в сервери вищих рівнів інформаційної системи, що призводить до зменшення ентропії інформаційних потоків при способі кодування в базисі Крестенсона.

### 3.3 Експериментальні дослідження кореляційних та ентропійних характеристик на прикладі цукрового виробництва

Процес цукрового виробництва проходить ряд стадій, на яких відбувається диференціація речовин на цукри і нецукри. Важливими показниками, які



характеризують виробничий процес на цукровому заводі є: цукристість сировини ( $C$ ); сухі речовини ( $Sr$ ); нормативна якість ( $Nr$ ).

Цукристість показує відсоткову кількість цукрової речовини у сировині. Сухі речовини – це показник речовин (цукрів і нецукрів), який змінюється у процесі виробництва і повинен прямувати до максимуму, щоб отримати максимальний вихід цукру. Нормативна якість – це відношення цукру до сухих речовин  $Nr = \frac{Zuc}{Sr}$ , де  $Zuc$  - цукрова речовина.

Дослідження кореляційних та ентропійних характеристик технологічних процесів проведених на базі експериментальних даних хімічної лабораторії цукрового виробництва по наступних параметрах: сухі речовини дифузійного соку (асимптотика інформаційної міри ентропії представлена на рисунку 3.8) та добра якість дифузійного соку (рисунок 3.9).

Стрибкоподібні зміни характеристик цукрового виробництва типу  $Nr$  клітинного соку (I стан),  $Nr$  дифузійного соку (II стан),  $Nr$  утфеля I продукції (III стан),  $Nr$  утфеля I продукції міжкристалічного відтіку (IV стан),  $Nr$  утфеля II продукції (V стан),  $Nr$  утфеля II продукції міжкристалічного відтіку (VI стан), які приводять до квазістаціонарності технологічних процесів цукрового виробництва в часі. В результаті аналізу ДІ технології цукрового виробництва, отримано характеристичні параметри процесів КС ДІ ( $M_x, D_x, I_x$ ) в згрупованому вигляді по станах квазістаціонарності, які подані в таблиці 3.2.

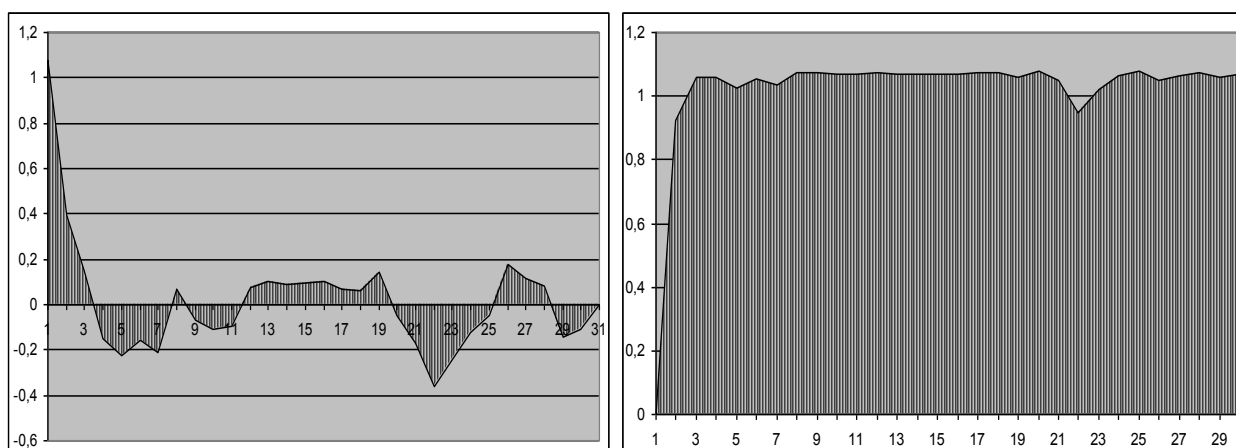


Рисунок 3.8 - Асимптотика інформаційної міри ентропії сухих речовин у дифузійному соці.

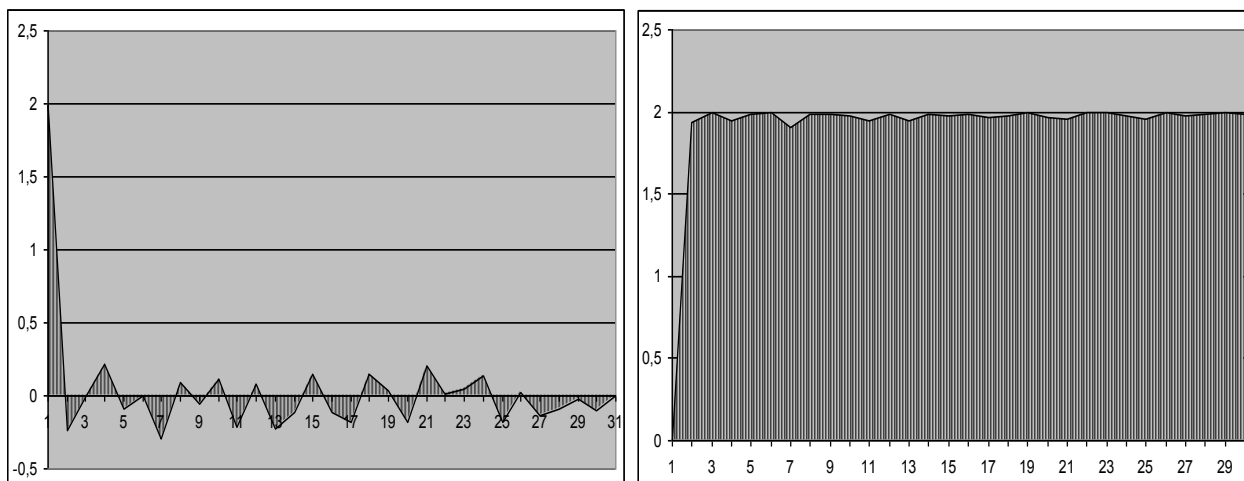


Рисунок 3.9 - Асимптотика інформаційної міри ентропії доброї якості у дифузійному соці.

Таблиця 3.2 - Групування по станах характеристичних параметрів КС ДІ технологічних показників цукрового виробництва

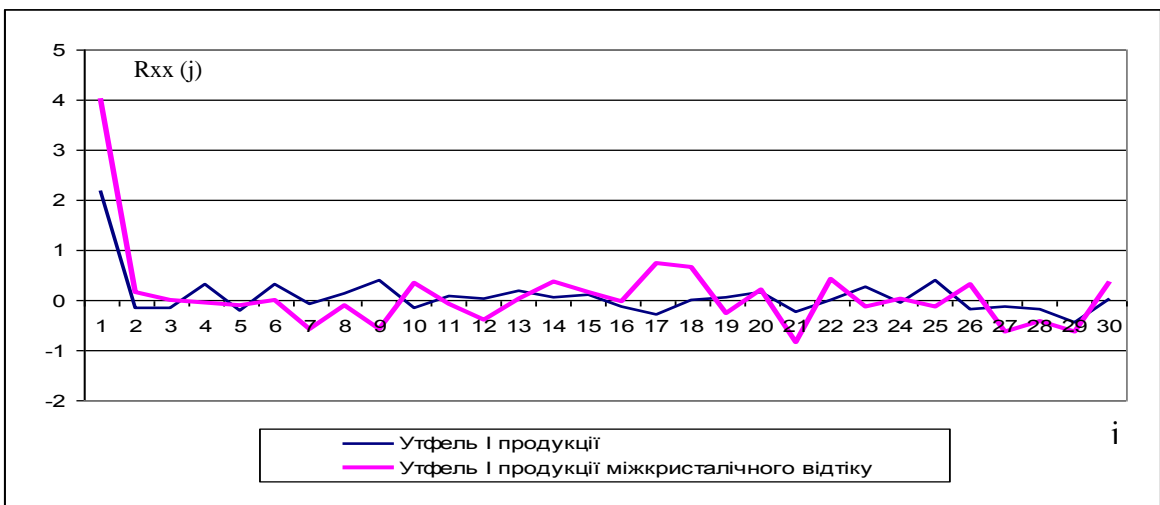
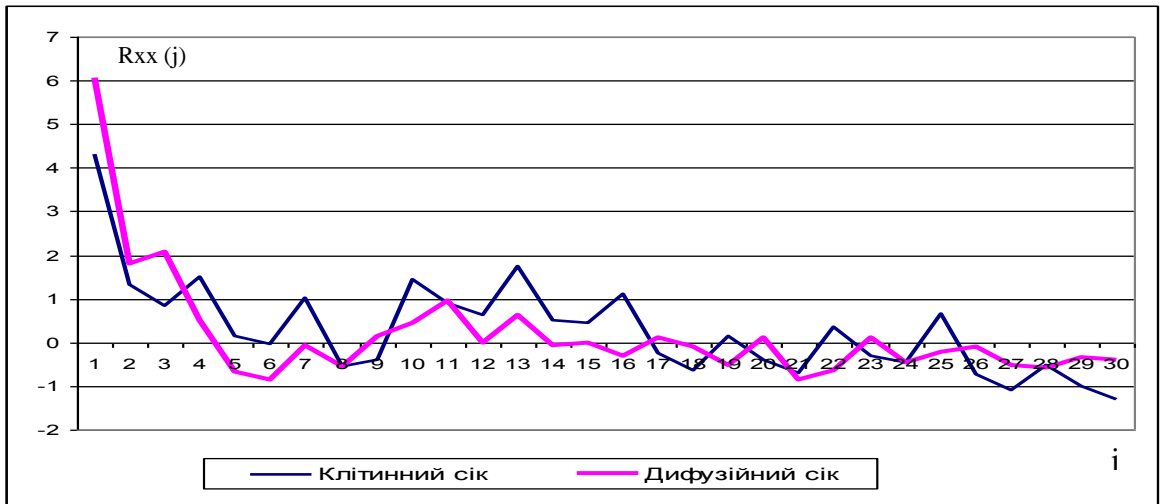
Математичне сподівання						
	I стан	II стан	III стан	IV стан	V стан	VI стан
1					80,92	80,59
2	84,57		86,35	86,28		
3		86,26				
Дисперсія						
	I стан	II стан	III стан	IV стан	V стан	VI стан
1						1,97
2	4,33			2,17	2,12	
3		2	4,02			
Ентропія						
	I стан	II стан	III стан	IV стан	V стан	VI стан
1	2,05	0,91	1,94	1,03	1	0,89

На рисунку 3.10 показано автокореляційні функції КС ДІ цукрового виробництва, які необхідні для розрахунку ентропії згідно виразу (4)

Для визначення  $Z_k$ -го стану автокореляційної функції КС ДІ технологічного процесу необхідно визначити межі інтервалу функції у вигляді

$$\frac{\left| \frac{R_{xx} - R_{yy}}{m} \right| \leq \nu, \text{ де } \nu - \text{гранична оцінка взаємної дисперсії, } m - \text{число точок}$$

кореляційної функції.



Рисунки 3.10 - Автокореляційні функції характеристик цукрового виробництва

Зміни станів характеристичних параметрів КС ДІ на прикладі цукрового виробництва представлені у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Матриця станів характеристичних параметрів КС ДІ нормативної якості

$Z_k$	I	II	III	II	IV	V
$\tilde{M}_x$	3	2	2	2	1	1
$D_x$	3	2	3	2	2	1
$\delta_x$	3	2	3	2	2	1
$R_{xx}$	2	1	2	1	1	2
$S_\omega$	2	1	2	1	1	2
$I_x$	1	2	3	2	4	5

На рисунку 3.11 показано графік квазістаціонарних ентропійних станів досліджуваного об'єкта виробництва

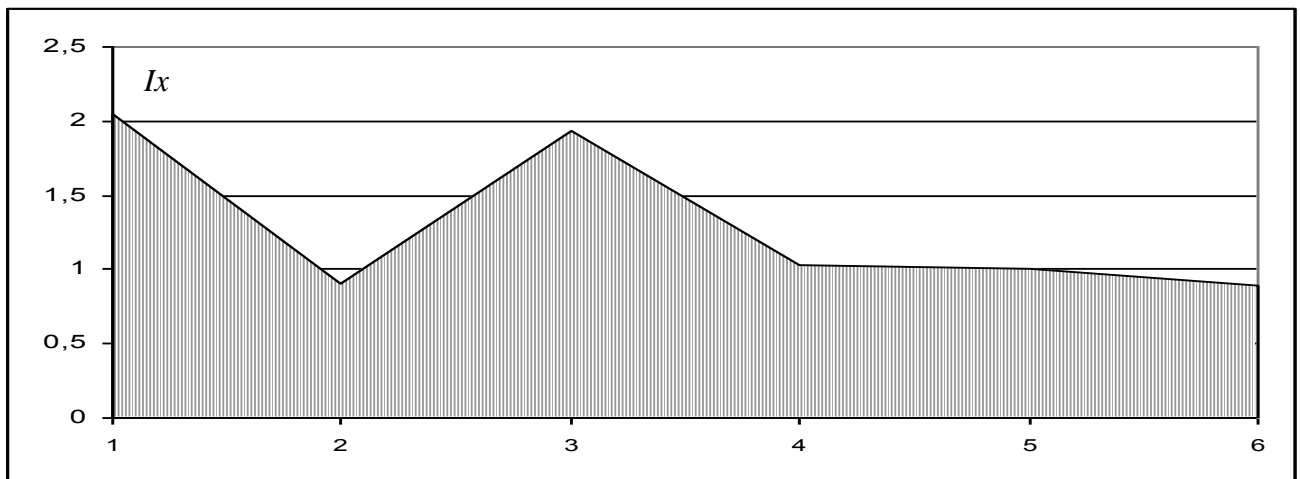


Рисунок 3.11 - Графік квазістаціонарних станів технологічних показників цукрового виробництва

У загальному випадку для об'єктів та технологічних процесів, параметри яких відповідають якісним регламентним характеристикам, відповідають пропорційному зростанню ентропії.

Таким чином з рисунка 3.11 видно, що найнижчий рівень якості виробництва спостерігається в другому квазістані, що відповідає процедурі дифузії цукристої речовини.

### 3.4 Розробка структури та дослідження системних характеристик спецпроцесорів визначення міри ентропії на основі різних кореляційних функцій

#### 3.4.1 Спецпроцесор визначення ентропії на основі автокореляційної функції у базисі Радемахера

Обчислення ентропії на основі функції автокореляції  $R_{xx}(j)$  виконується на основі такого виразу [27]:

$$I_x(K) = \hat{E} \left[ \log_2 \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left( D_x^2 - R_{xx}^2(j) \right) \right], \quad (3.8)$$

де  $m$  – число точок функції автокореляції на інтервалі кореляції.

Структура процесора визначення ентропії на основі виразу (3.8) показана на рисунку 3.12.

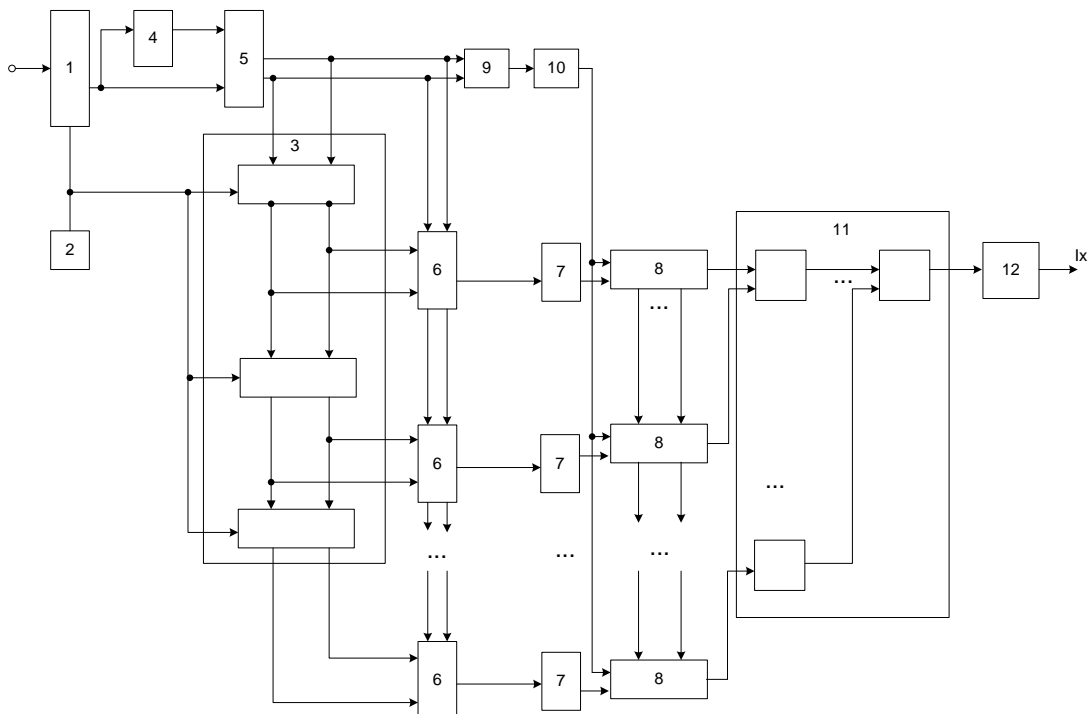


Рисунок 3.12 - Структура процесора визначення ентропії на основі  $R_{xx}(j)$ .

На рисунку 3.12 зображена структурна схема пристрою, який містить: 1 – аналогово-цифровий перетворювач; 2 – синхронізатор; 3 – багатофазовий регістр зсуву; 4 – пристрій обчислення математичного сподівання; 5 – пристрій віднімання; 6 – перемножувачі; 7 – квадратори; 8 – група суматорів; 9 – пристрій обчислення дисперсії; 10 – квадратор; 11 – пірамідальний суматор; 12 – шифратор;  $I_x$  – значення автокореляційної міри ентропії.

Пристрій працює наступним чином. Робота процесора виконується під дією сигналів синхронізатора 2, який в кожному циклі вимірювання формує короткі імпульси, які по фронту наростання зсувають інформацію в багатофазовому регістрі зсуву 3, а по фронту спаду запускається аналого-цифровий перетворювач 3. Вхідний аналоговий сигнал  $x(t)$  в аналого-цифровому перетворювачі 1 паралельного типу перетворюється в  $k$ -розрядні цифрові двійкові коди, які поступають на вхід пристрою обчислення математичного сподівання 4, вхід якого підключений до першого входу пристрою віднімання 5, другий вихід якого підключений до виходу аналого-цифрового перетворювача 1, при цьому на виходах пристрою віднімання 5 формуються цифрові коди центрованих значень та їх знаку, які одночасно подаються на входи першого каналу багатофазового регістру зсуву 3, входи текучих значень перемножувачів 6 та пристрій обчислення дисперсії 9. В багатофазовому регістрі зсуву 3, зсунуті центровані значення цифрових відліків перемножуються з текучим значенням, а результати через квадратори 7 віднімаються від квадрату дисперсії. Причому, операція віднімання замінена операцією додавання квадратів зсунутих центрованих значень з доповнюючим кодом квадрату дисперсії, який формується на виході шифратора 10. Отримані коди на виходах пристроїв віднімання 8 сумуються в матричному суматорі 11 і перетворюються в цілочисельні коди логарифмів, які відповідають ентропії вхідних сигналів на виході пристрою.

3.4.2 Спецпроцесор визначення ентропії на основі унітарного АЦП та базису Радемахера з використанням функції еквівалентності  $F_{xx}(t)$

Обчислення ентропії на основі функції еквівалентності виконується згідно аналітичного виразу

$$I_x(F) = \hat{E} \left[ \log_2 \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left( (M_x^2 - F_{xx}^2) \right) \right] \quad (3.9)$$

На рисунку 3.13 показана структура спецпроцесора, який містить: 1 – аналогово-цифровий перетворювач; 2 – група регістрів; 3 – синхронізатор; 4 – група елементів НЕ; 5 – суматори; 6 – елементи І; 7 – пристрій обчислення ковзного математичного сподівання; 8 – квадратор; 9 – квадратори; 10 – група суматорів; 11 – пірамідальний суматор; 12 – шифратор;  $I_x$  – значення автокореляційної міри ентропії.

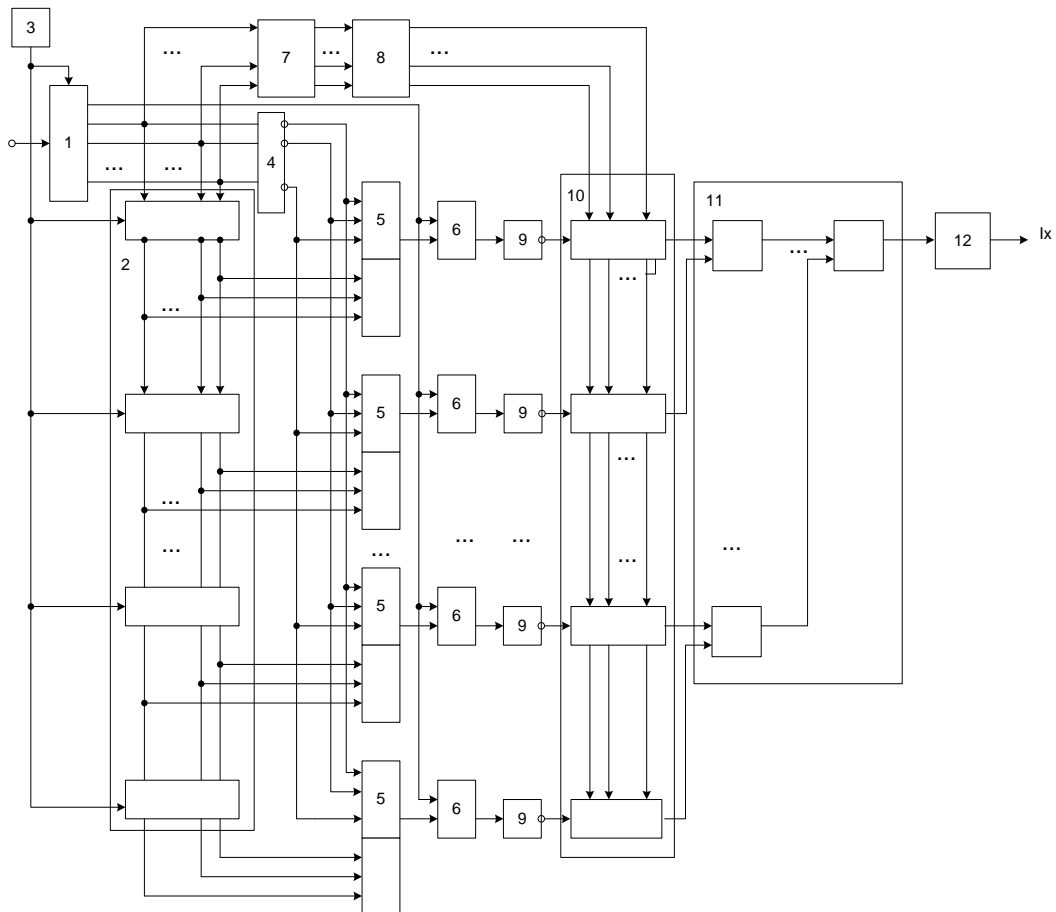


Рисунок 3.13 - Структура процесора визначення ентропії на основі унітарного АЦП та базису Радемахера з використанням функції еквівалентності

Пристрій працює наступним чином. На початку кожного циклу вимірювання на виході синхронізатора 3 формується короткий імпульс, по фронту наростання якого здійснюється зсув в групі регістрів 2, а по фронту спаду

запуск аналого-цифрового перетворювача 1. При запуску аналого-цифрового перетворювача 1 його виходи скидаються в нульовий стан, що викликає появу одиничних потенціалів на перших входах двійкових суматорів 5. При цьому формуються поодинокі потенціали на тих виходах перенесення суматорів 5, які містять у своїх каскадах групи регістрів 2 коди, відмінні від нуля. На унітарному виході аналого-цифрового перетворювача 1 формується унітарний код поточного значення вхідного процесу. Одночасно з цим на аналогічних виходах аналогово-цифрового перетворювача 1 формується лінійна зростаюча послідовність двійкових кодів, останній з яких дорівнює поточному значенням вхідного процесу. В результаті в суматорах 5 проводиться порівняння кодів, що зберігаються в групі 2 і коду поточного відліку. Якщо значення відліку в  $j$ -му регістрі групи 2 менше від поточного значення ( $x_{i+j} < x_i$ ), то в момент збігу кодів на виході двійкового  $j$ -го суматора 5 формується сигнал логічного нуля, що закриває свій елемент І 6. Таким чином, з виходу елемента І 6 на відповідний квадратор 9 надходить унітарний код, рівний значенню  $Z_{i,j} = x_{i+j}$ . Якщо значення відліку в  $j$ -му регістрі групи 2 більше поточного значення ( $x_{i+j} > x_i$ ), то формування сигналу логічного нуля на виході  $j$ -го суматора 5 не відбувається, за рахунок чого на вхід  $j$ -го квадратора 9 надходить унітарний код значення  $Z_{i,j} = x_i$ . Значення з інверсних виходів квадраторів 9 подається на входи групи суматорів 10 і додається з доповнюючим кодом квадрату ковзного математичного сподівання, який формується на виході квадратора 8. Значення  $M_x$  визначається в пристрої для обчислення ковзного математичного сподівання 7, який працює, як показано в аналогу. В результаті в кожному  $N$ -му елементі суматора 10 формується результат додавання текучого інверсного коду квадратора 9 з доповнюючим кодом квадратора 8, що відповідає операції віднімання квадратів  $M_x^2 - F_x^2$ . При цьому оскільки  $M_x^2$  завжди більший  $F_x^2$  то результат операції завжди буде додатній і представлений в прямому нормалізованому коді. Дані всіх суматорів сумуються в пірамідальному суматорі 11 і поступають на вхід шифратора 12, який виконує функцію цифрового логарифмування та округлення до більшого цілого. Вихід шифратора 12 є кодовим виходом пристрою.



### 3.4.3 Спецпроцесор визначення ентропії на основі унітарного АЦП та використання функції еквівалентності $F_{xx}$

Структура процесора визначення ентропії показана на рисунку 3.14.

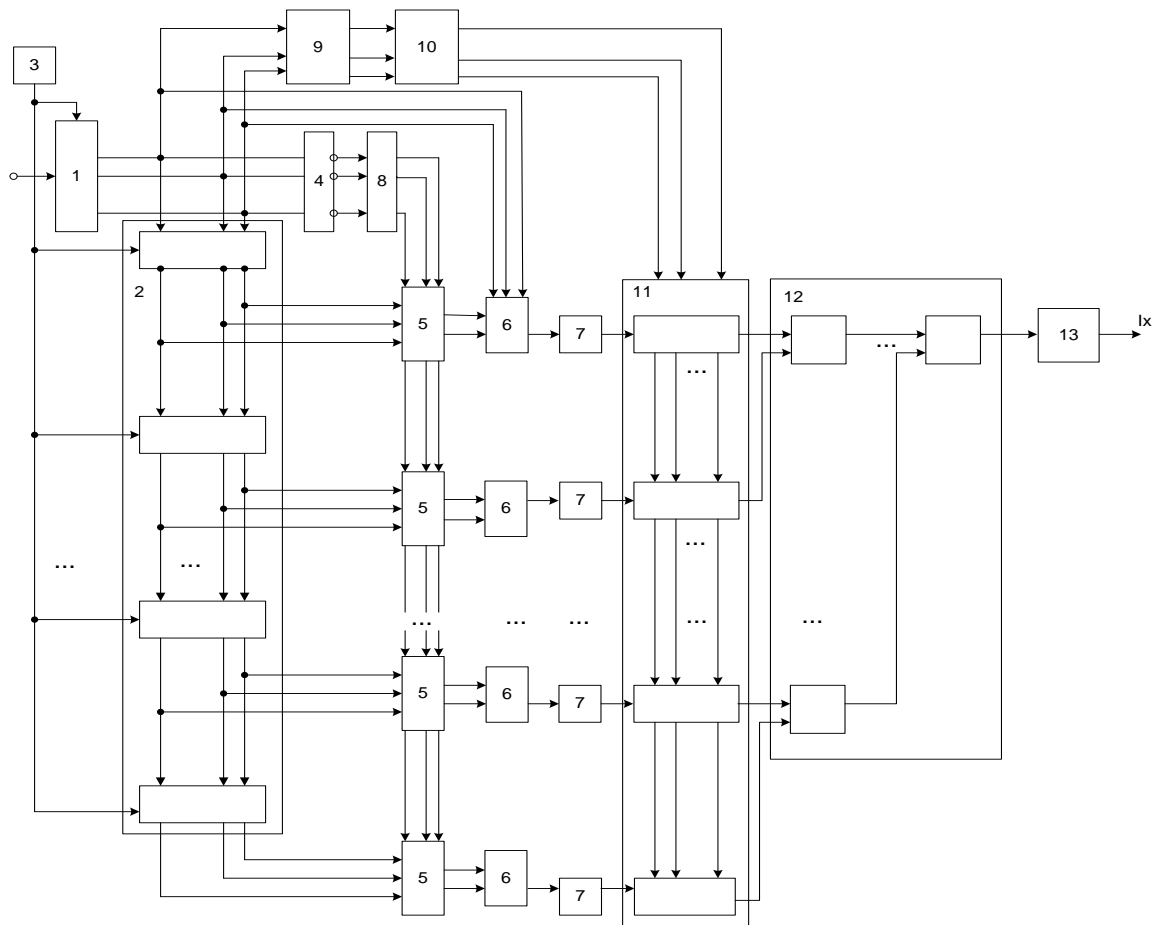


Рисунок 3.14 - Структура процесора визначення ентропії на основі АЦП та використання функції еквівалентності

Процесор містить: 1 – аналогово-цифровий перетворювач; 2 – група регістрів; 3 – синхронізатор; 4 – група елементів НЕ; 5 – суматори; 6 – мультиплектори; 7 – квадратор; 8 – суматор; 9 – пристрій обчислення ковзного математичного сподівання; 10 – шифратор; 11 – група суматорів; 12 – пірамідальний суматор; 13 – шифратор;  $I_x$  – значення автокореляційної міри ентропії.

Пристрій працює наступним чином. На початку кожного циклу вимірювання на виході синхронізатора 3 формується короткий імпульс по фронту наростання якого здійснюється зсув в групі регістрів 2, а по фронту спаду запуск аналого-цифрового перетворювача 1. Одночасно з цим на розрядних виходах

аналого-цифрового перетворювача 1 формується двійковий код вхідного сигналу. В результаті на виходах суматора 8 формується доповнюючий код текучого цифрового значення  $x_i$ , який подається на входи суматорів 5, де відбувається порівняння  $x_i$  з кожним зсунутим  $x_{i-j}$  шляхом додавання доповнюючого коду з кодом  $x_{i-j}$ . При цьому, якщо в результаті наскрізного переносу цих кодів виникає переповнення в суматорі 5, то  $(x_{i-j} < x_i)$ . Сигнал “1” подається на керуючий вхід мультиплексора, на виході якого формується код елемента функції еквівалентності  $Z = x_i$ . Якщо в результаті додавання  $x_{i-d}$  та  $x_{i-j}$  переповнення розрядної сітки в суматорі 5 не виникає і на його другому виході формується сигнал “0” – це означає, що  $(x_{i-j} \leq x_i)$  і на виході мультиплексора формується код  $Z = x_{i-j}$ . Таким чином сформовані в кожному  $i$ -му каналі коди елементів функції  $Z_{i-j}$  подаються на квадратори 7, на виході яких формуються квадрати  $F_{x_{i-j}}^2$ . В суматорах 11 шляхом додавання з доповнюючим кодом квадрату ковзного математичного сподівання відбувається обчислення різниці  $M_x^2 - F_{x_{i-j}}^2$ , коди яких поступають на пірамідальний суматор 12, логарифмуються в шифраторі 13, на виході якого формується вихідний код ентропії.

#### 3.4.4 Швидкодіючий спецпроцесор визначення ентропії на основі функції еквівалентності $F_{xx}$

На рисунку 3.15 показана структура швидкодіючого спецпроцесора визначення ентропії і опис його роботи.

На рисунку 3.15 показана структура спецпроцесора, який містить: 1 – аналогово-цифровий перетворювач; 2 – багатофазовий регістр зсуву; 3 – синхронізатор; 4 – група елементів І; 5 – лічильники; 6 – квадратори; 7 – шифратор; 8 – група суматорів; 9 – пірамідальний суматор; 10 – шифратор; Іх – значення кореляційної міри ентропії.

Пристрій працює наступним чином.

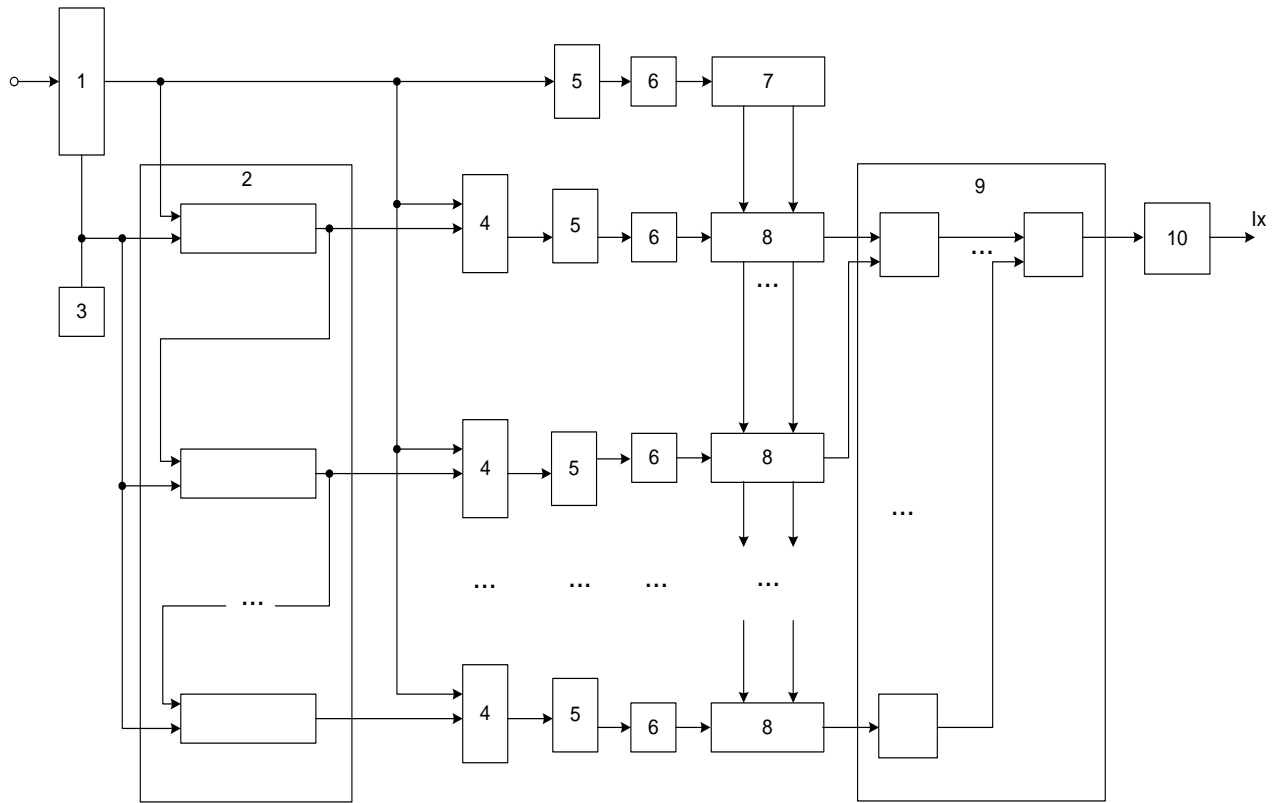


Рисунок 3.15 - Структура швидкодіючого спецпроцесора визначення ентропії на основі функції еквівалентності  $F_{xx}$

На початку формування потоку кодів ентропії на виході процесора відбувається скид регістрів 2 та лічильників 5 у нульовий стан. В кожному циклі на першому виході синхронізатора 3 формується імпульс запуску аналого-цифрового перетворювача 1. Синхронно з формуванням інвертованих у часі унітарних кодів  $\overleftarrow{t}_i$  на виході аналого-цифрового перетворювача 1 сигнали синхронізації подаються на відповідні входи багатозафазових регістрів зсуву 2 і відбувається зсув інформації, а також порівняння зсунутих кодів  $\overleftarrow{t}_{i-j}$  з  $\overleftarrow{t}_i$  в логічних елементах "І" 4, на виході яких формуються число-імпульсні коди  $\check{Z}_{i,i-j}$  елементів функції еквівалентності  $F_{xx}(j)$ . Коди  $\check{Z}_{i,i-j}$  сумуються у відповідних  $j$ -тих лічильниках 5 і підносяться до квадрату у квадраторах 6. Одночасно на виході лічильника "L<sub>0</sub>" 5 формується код математичного сподівання, який після піднесення до квадрату в квадраторі 6 перетворюється у доповнюючий код  $\check{M}_x^2 d$  у шифраторі 7, де запам'ятовується, розрядний код

якого подається на перші розрядні входи суматорів 8 усіх каналів. В суматорах 8 відбувається обчислення  $(M_x^2 - F_{xx}^2(j))$  шляхом додавання коду  $M_x^2$  до доповнюючих кодів  $[F_{xx}^2(j)]$ , які формуються на виходах квадраторів 6. У результаті сумування кодів  $(M_x^2 + [F_{xx}^2(j)])$  у пірамідальному суматорі 9, ділення отриманого коду на  $m$ , яке вибирається кратним  $2^k$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ , шляхом відкидання молодших розрядів та цілочисельного логарифмування отриманого коду в шифраторі 10 на його виході отримують двійковий код оцінки ентропії вхідних сигналів  $x(t)$ .

### 3.4.5 Оцінка апаратної та часової складності спецпроцесорів

Розрахунок апаратної складності спецпроцесорів був виконаний на основі експертних оцінок апаратної складності їх компонентів згідно таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Апаратна складність спецпроцесорів

Спец-процесор	Складність компонентів спецпроцесорів										Сумарна складність (с)
	АЦП	$M_x$	$M_x^2$	$x_i$	$D_x$	$D_x^2$	$R_{xx}^2$ $F_{xx}^2$	$D_x^2 - R_{xx}^2$	$\Sigma_{\Delta}$	log	
3.12	24.3	21	–	–	–	22	21	18	96	4	0.4
3.13	4940	–	24	–	–	–	21	–	96	4	9
3.14	24.3	21	–	–	–	–	21	–	96	4	0.3
3.15	24.3	–	–	18	–	–	21	–	96	4	0.29

Проведені дослідження показують перспективу використання, масового тиражування у вигляді окремих кристалів спецпроцесорів визначення ентропії. Крім того, можна розширити їх функціональні можливості вивівши виходи

$$M_x, x_i, x_i, D_x, R_{xx}, F_{xx}.$$

## Висновки до розділу 3

1. Проведений аналіз структури та компонентів спецпроцесора кореляційної міри ентропії, що дозволило розрахувати характеристики їх апріорної та часової складності при реалізації у різних ТЧБ та вибрати системно-сумісні компоненти запропонованого спецпроцесора.

2. Розроблені структури та проаналізовані характеристики високопродуктивних спецпроцесорів визначення ентропії з використанням унітарного ТЧБ та АЦП у базисі Радемахера, які дозволили вибрати базову структуру спецпроцесора.

3. Застосування ентропійно-кореляційного спецпроцесора дозволило підвищити швидкодію реакції комп'ютеризованої системи на відхилення технології виробництва, знизити вимоги до числа каналів та швидкості передавання інформації до центрального сервера, вивільнити його ресурси на 26% і використати їх для потреб управління технологічними процесами.

## ВИСНОВКИ

1. Запропоновано метод формування характеристик складних джерел інформації на основі ентропійного підходу, який забезпечує підвищення рівня інтегрованості подання ймовірно-статистичних параметрів джерел інформації, що дозволило зменшити об'єм інформаційних потоків на низових рівнях комп'ютерних систем, а також підвищити їх інформативність.

2. Розроблено ентропійно-кореляційні моделі джерел інформації, що дозволило підвищити компактність інтегрованого кодування та подання їх інформаційних моделей на низових рівнях розподілених комп'ютерних систем, а також підвищити ефективність використання джерел інформації у системах реального часу.

3. Запропоновані структурні та принципіві рішення спецпроцесорів ентропійно-кореляційного опрацювання інформації з використанням унітарного теоретико-числового базису та аналого-цифрового перетворювача у базисі Радемахера, які дозволили вибрати базову структуру спецпроцесора.

4. Застосування ентропійно-кореляційного спецпроцесора дозволило підвищити швидкодію реакції комп'ютеризованої системи на відхилення технології виробництва та вивільнити ресурси центрального сервера на 26% і використати їх для потреб управління технологічними процесами.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.

1. Палагин А.В. Опыт разработки микропроцесорных распределенных систем реального времени /А.В. Палагин, Я.М. Николайчук. – К.: Знание, 1988.- 19 с.
2. Николайчук Я.М. Теорія джерел інформації / Я.М. Николайчук // Видання друге, виправлене, – Тернопіль: ТзОВ “Терно-граф”, 2010. – 536 с.
3. Погонєць І.О. Методи визначення ентропії джерел інформації / І.О. Погонєць, Я.М. Николайчук // Вісник Хмельницького національного університету, 2007. – № 2, Т.1(90). – С. 93–99.
4. Сегін А.І. Побудова алгоритмів формування моделей джерел інформації для автоматизованих систем реального часу / А.І. Сегін // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Методи і засоби технічної діагностики. № 36. Т.8. – Івано-Франківськ.: ІФДТУНГ, 1999. – С. 84-93.
5. Локазюк В.М. Інтелектуальне діагностування мікропроцесорних пристроїв та систем / В.М. Локазюк, О.В. Поморова, А.О. Домінов // Навч. посібник для вузів. – 2001. – 286 с.
6. Погонєць І.О. Ентропійні властивості моделей джерел інформації / І.О. Погонєць // Праці міжнародної проблемно-наукової міжгалузевої конференції “Інформаційні проблеми комп’ютерних систем, юриспруденції, енергетики, економіки, моделювання”. – ПНМК-2009, Бучач. – С. 221-225.
7. Pogonets I. Estimations of entropy measures of the different classes information sources / I. Pogonets // Proc. of the International Conference “Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science” TCSET 2010. – Lviv-Slavske. – p. 309.
8. Погонєць І.О. Метод побудови ентропійної моделі квазістаціонарного джерела інформації / І.О. Погонєць, А.Р. Воронич // Праці міжнародного симпозиуму: Питання оптимізації обчислень – Крим Велика Ялта, смт. Кацівелі. – 2009. – Т2. – С. 214-219.
9. Воронич А.Р. Ентропійні методи формування та цифрового опрацювання сигналів у системах ідентифікації станів квазістаціонарних об’єктів./ А.Р. Воронич, І.О. Погонєць, В.Я. Піх // Праці міжнародної молодіжної

- математичної школи. Питання оптимізації обчислень (ПОО – XXXVII) – Крим, Велика Ялта, смт. Кацівелі. – 2011. – С. 34-35.
- 10.Николайчук Я.М. Теоретичні основи формування ентропійних моделей на базі кореляційних функцій / Я.М. Николайчук, А.І. Сегін, І.О. Сабадаш // Інформаційні технології і системи. – Науково-технічний журнал. – Львів. – 2002. – Т.5. – № 1-2. – С. 13-21.
  - 11.Хартли Р.Л. Передача информации / Р.Л. Хартли // Теория информации и ее приложения. – М., 1959. – 350с.
  - 12.Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон. – Издательство иностранной литературы, 1963. – 438 с.
  - 13.Колмогоров А.Н. Теория передачи информации / А.Н. Колмогоров. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – 15 с.
  - 14.Longo G. Quantitative-qualitative measure of information / G. Longo // Centre of mechan. Sciences (Sommerkurs in Indien). Springer-Verlag, 1972.
  - 15.1. Shults G. Informationstheorie mit Bewertung / G. Shults // Wiss-Zeitschrift Humboldt Univer. – Berlin XX, 1971. – P. 175-183.
  - 16.Миддлтон Д. Введение в статистическую теорию связи / Д. Миддлтон. – М.: Советское радио, 1961. – 768 с.
  - 17.Таллер В. Теоретические ограничения скорости передачи информации. Теория информации и её приложения / В. Таллер, А. Харкевич. – М.: Физматгиз, 1959. – С. 58–81.
  - 18.Боюн В.П. Методы определения  $\delta$ -энтропии случайных процессов / В.П. Боюн // УсиМ. – 2000. – №4. – С. 14-19.
  - 19.Лапа В.Г. Математические основы кибернетики / В.Г. Лапа. – К.: И-во “Вища школа”, 1974. – 452 с.
  - 20.Махс J. Entropy estimation of symbol sequences / J. Махс, P. Grassberger. – Chaos, 1996, P. 414-427.
  - 21.Голдман С. Теория информации / С. Голдман. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1975. – 382 с.
  - 22.Кузьмин К.В. Основы теории информации и кодирования / К.В. Кузьмин В.А. Кедрюс // К.: Вища школа, 1986. – 238 с.



- 23.Николайчук Я.М. Теорія та процесори визначення інформаційної міри ентропії на основі кореляційних функцій / Я.М. Николайчук, І.О. Погонєць, А.Р. Воронич, І.Б. Албанський // Науковий вісник Чернівецького університету. Комп'ютерні системи та компоненти. – 2011 – Т2. – Випуск 2. – С. 37-45.
- 24.Погонєць І.О. Теорія ентропії джерел інформації та її застосування в задачах штучного інтелекту / Погонєць І.О. // Журнал “Штучний інтелект” ШІ-2009. – Донецьк, – 2009. – Т1. – С. 56-61.
- 25.Погонєць І.О. Розробка структур та функціональних характеристик комп'ютерної системи діагностування станів складних промислових об'єктів /Погонєць І.О. // Науковий вісник Чернівецького університету. Комп'ютерні системи та компоненти. – 2011 – Т2. – Випуск 3. – С. 93-97.
- 26.Погонєць І.О. Ентропійні методи аналізу квазістаціонарних джерел інформації / Погонєць І.О. // Праці міжнародної проблемно-наукової міжгалузевої конференції “Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, енергетики, економіки, моделювання” – ПНМК-2008 – Бучач. – С. 38-42.
- 27.Погонєць І.О. Спецпроцесори визначення кореляційної ентропії./ І.О. Погонєць, А.Р. Воронич // Збірник матеріалів проблемно-наукової міжгалузевої конференції “Юриспруденція та проблеми інформаційного суспільства” – ЮПС – 2011.– Івано-Франківськ. – С. 125-129.
- 28.Методичні рекомендації до виконання дипломної роботи з освітньо-кваліфікаційного рівня „магістр”. Спеціальність „Комп'ютерні системи та мережі” / М.П.Карпінський, О.М.Березький, Р.Б.Трембач, Н.М.Васильків / Під ред. М.П.Карпінського – Тернопіль: ТНЕУ, 2008. – 41 с.