

Вінницький національний технічний університет
Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем
Кафедра телекомунікаційних систем та телебачення

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему:
**«Підвищення завадостійкості та інформаційної ефективності
телекомунікаційних радіосистем»**

Виконав: студент 2-го курсу,
групи ТКС-20м
спеціальності 172 – Телекомунікації та
радіотехніка
_____ Мельничук О.М.

Керівник: к.т.н., доцент каф. ТКСТБ
_____ Васильківський М.В.
« ____ » _____ 2021 р.

Опонент: д.т.н., професор каф. РТ
_____ Осадчук В.С.
« ____ » _____ 2021 р.

Допущено до захисту
Завідувач кафедри ТКСТБ
_____ д.т.н., проф. Кичак В.М.
« ____ » _____ 2021 р.

Вінниця ВНТУ - 2021 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем
Кафедра телекомунікаційних систем та телебачення
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань - 17– Електроніка та телекомунікації
(шифр і назва)
Спеціальність - 172 – Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва)
Освітньо-професійна програма - Телекомунікаційні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТКСТБ
д.т.н., професор В.М. Кичак
“ ___ ” _____ 2021 року

З А В Д А Н Н Я **НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Мельничуку Олегу Михайловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Підвищення завадостійкості та інформаційної ефективності телекомунікаційних радіосистем

керівник роботи Васильківський Микола Володимирович, канд. техн. наук, доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “24” 09 2021 року № 277

2. Строк подання студентом роботи 01 грудня 2021 року

3. Вихідні дані до роботи коефіцієнт бітових помилок – 10^{-5} ; довжина кадру при визначенні вектору помилки – 1024 біта; кількість кадрів для агрегації статистичних даних – 1000; формат модуляції сигналів – QPSK/QAM-16; діапазон значень ВСШ для алгоритму підвищення ефективності ТКС – 0-12 дБ; довжина кадру – 10^7 символів; порогове значення фазового розбалансу - 10^0 ; порогове значення амплітудного розбалансу – 0,1; підвищення завадостійкості ТКС – 1,3 дБ.

4. Зміст текстової частини: параметри ефективності телекомунікаційних радіосистем; розробка і дослідження алгоритму ідентифікації і компенсації спотворення сузір'я радіосигналу з модуляцією BPSK; дослідження методики ідентифікації спотворення сузір'я радіосигналу з модуляцією QPSK; ідентифікація спотворення сузір'я радіосигналу з модуляцією QAM-16.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) блок-схема алгоритму визначення впливу спотворень і активації системи компенсації; блок-схема роботи методики ідентифікації спотворення; структурна схема системи моделювання процесу агрегації та аналізу даних; блок-схема функціонування системи моделювання ідентифікації спотворення радіосигналу; блок-схема алгоритму розрахунку апроксимованої підсилювальної характеристики; схема моделювання спотворень; блок-схема роботи системи ідентифікації спотворень.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Васильківський М.В., доцент кафедри ТКСТБ		

7. Дата видачі завдання 01 вересня 2021 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розробка технічного завдання	10.09.2021р.	
2.	Параметри ефективності телекомунікаційних радіосистем	17.09.2021р.	
3.	Розробка і дослідження алгоритму ідентифікації і компенсації спотворення сузір'я радіосигналу з модуляцією BPSK	01.10.2021р.	
4.	Дослідження методики ідентифікації спотворення сузір'я радіосигналу з модуляцією QPSK	29.10.2021р.	
5.	Ідентифікація спотворення сузір'я радіосигналу з модуляцією QAM-16	19.11.2021р.	
6.	Аналіз економічної ефективності розробки	30.11.2021р.	
7.	• Охорона праці та безпека життєдіяльності	06.12.2021р.	
8.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	13.12.2021р.	
9.	Нормоконтроль МКР	14.12.2021р.	
10.	Попередній захист МКР, опонування МКР	17.12.2021р.	
11.	Захист МКР ЕК	20.12.2021р.	

Студент

(підпис)

Мельничук О.М.

Керівник роботи

Васильківський М.В.

ФІРЕН

ТКСТБ

ВНТУ

АНОТАЦІЯ

УДК 621.391

Мельничук О. М. Підвищення завадостійкості та інформаційної ефективності телекомунікаційних радіосистем – магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка, освітня програма – Телекомунікаційні системи та мережі – Вінниця: ВНТУ 2021 р. 130 - стор., 60 – рис., 24 – табл., 35 – бібл. – українською мовою.

Розроблено алгоритм детектування і компенсації спотворення сигнального сузір'я BPSK на основі аналізу вектора помилок і статистичних характеристик ТЗ, основною особливістю якого є здатність компенсувати спотворення сузір'я сигналу BPSK на відміну від широко розповсюджених алгоритмів сліпої компенсації.

Розроблено методику ідентифікації типу спотворення радіосигналу з модуляцією QPSK - QAM-4, що дозволяє ідентифікувати і розрізняти такі спотворення, як амплітудний і фазовий розбаланс квадратур.

Розроблено методику ідентифікації спотворень радіосигналу QAM16, засновану на аналізі поведінки вектора помилок при передачі різних канальних символів.

Ключові слова: сліпе компенсування спотворення, сузір'я сигналу BPSK, радіосигнал з модуляцією QPSK - QAM-4, амплітудний і фазовий розбаланс квадратур, поведінка вектора помилок, адитивний білий гаусовий шум, цифрова обробка сигналів, програмована логічна інтегральна схема, відношення сигнал / шум, фільтр основної селекції, малoshумний підсилювач, телекомунікаційна система.

ABSTRACT

UDC 621.391

Melnychuk O. M. Improving noise immunity and information efficiency of telecommunication radio systems - master's thesis in specialty 172 - Telecommunications and radio engineering, educational program - Telecommunication systems and networks - Vinnytsia: VNTU 2021 130 - pp., 60 - fig., 24 - table., 35 - bibl. - in Ukrainian.

An algorithm for detecting and compensating for distortion of the BPSK signaling constellation based on error vector analysis and statistical characteristics of vehicles has been developed, the main feature of which is the ability to compensate for distortion of the BPSK signaling constellation in contrast to common blind compensation algorithms.

A method for identifying the type of radio signal distortion with QPSK - QAM-4 modulation has been developed, which allows to identify and distinguish such distortions as amplitude and phase imbalance of quadratures.

A method for identifying distortions of the QAM16 radio signal based on the analysis of the behavior of the error vector during the transmission of different channel symbols has been developed.

Keywords: blind distortion compensation, BPSK signal constellation, radio signal with QPSK - QAM-4 modulation, amplitude and phase imbalance of quadratures, error vector behavior, additive white Gaussian noise, digital signal processing, programmable logic integrated circuit / signal circuit, signal ratio, basic selection filter, low - noise amplifier, telecommunication system.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	8
1 ПАРАМЕТРИ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ РАДІОСИСТЕМ	12
1.1 Технологія програмно-керованого радіо і основні концепції її розвитку.....	12
1.2 Основні причини виникнення спотворень радіосигналів в телекомунікаційних системах.....	16
1.3 Квадратурна обробка сигналів в контексті програмно-керованого радіо ..	18
1.4 Метрики оцінки якості радіосигналів з квадратурною модуляцією.....	23
1.5 Еталонне і нееталонне обчислення метрик оцінки якості	25
1.6 Висновки до розділу 1	27
2 РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМУ ІДЕНТИФІКАЦІЇ І КОМПЕНСАЦІЇ СПОТВОРЕННЯ СУЗІР'Я РАДІОСИГНАЛУ З МОДУЛЯЦІЄЮ BPSK.....	29
2.1 Аналіз завадостійкості прийому при спотворенні сигнального сузір'я сигналу з модуляцією BPSK	30
2.2 Алгоритм ідентифікації спотворення і його компенсації	31
2.3 Особливості роботи алгоритму компенсації	33
2.4 Приклад роботи системи компенсації спотворення сигнального сузір'я BPSK.....	39
2.5 Висновки до розділу 2	41
3 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДИКИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ СПОТВОРЕННЯ СУЗІР'Я РАДІОСИГНАЛУ З МОДУЛЯЦІЄЮ QPSK	42
3.1 Розрахунок завадостійкості радіосигналу з модуляцією QPSK.....	42
3.2 Механізм ідентифікації спотворення радіосигналу з QPSK.....	48
3.5 Моделювання роботи методики ідентифікації спотворення радіосигналу.....	58
3.6 Огляд результатів роботи методики.....	61

	3
3.7 Висновки до розділу 3	62
4 ІДЕНТИФІКАЦІЯ СПОТВОРЕННЯ СУЗІР'Я РАДІОСИГНАЛУ З МОДУЛЯЦІЄЮ QAM-16.....	64
4.1 Особливості оцінювання якості радіосигналу	64
4.2 Нелінійне спотворення сузір'я та методика відтворення підсилувальної характеристики.....	65
4.3 Лінійні спотворення сигнального сузір'я.....	71
4.4 Ідентифікація спотворення на виході передавача	73
4.5 Висновки до розділу 4	81
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	83
5.1 Оцінювання наукового ефекту.....	83
5.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи.....	86
5.2.1 Витрати на оплату праці.....	87
5.2.2 Відрахування на соціальні заходи	89
5.2.3 Сировина та матеріали.....	90
5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі.....	91
5.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт	92
5.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт	93
5.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень	94
5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей	95
5.2.9 Службові відрядження.....	96
5.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації	97
5.2.11 Інші витрати.....	97
5.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати.....	98
5.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи	99
5.4 Висновок до розділу 4.....	101
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	102
6.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	102

	4
6.1.1 Обладнання приміщення та робочого місця	102
6.1.2 Електробезпека приміщення.....	104
6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	105
6.2.1 Мікроклімат	105
6.2.2 Склад повітря робочої зони.....	106
6.2.3 Виробниче освітлення.....	106
6.2.4 Виробничий шум.....	108
6.2.5 Виробничі випромінювання.....	108
6.2.6 Психофізіологічні фактори	109
6.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи телекомунікаційної радіосистеми в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій	110
6.3.1 Дослідження стійкості роботи телекомунікаційної радіосистеми в умовах дії іонізуючих випромінювань.....	111
6.3.2 Дослідження стійкості роботи телекомунікаційної радіосистеми в умовах дії електромагнітного імпульсу	113
6.4 Розробка заходів по підвищенню стійкості роботи телекомунікаційної радіосистеми в умовах надзвичайних ситуацій	114
6.5 Висновки до розділу 6	116
ВИСНОВКИ.....	117
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	120
ДОДАТКИ.....	124
Додаток А Технічне завдання	125
Додаток Б Блок-схема алгоритму визначення впливу спотворень і активації системи компенсації.....	126
Додаток В Блок-схема роботи методики ідентифікації спотворення.....	127
Додаток Г Структурна схема системи моделювання процесу агрегації та аналізу даних	128
Додаток Д Блок-схема функціонування системи моделювання ідентифікації спотворення радіосигналу	129

Додаток Е Блок-схема алгоритму розрахунку апроксимованої підсилювальної характеристики	130
Додаток Є Схема моделювання спотворень.....	131
Додаток Ж Блок-схема роботи системи ідентифікації спотворень	132

ФІРЕН

ТКСТБ

ВНТУ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АБГШ - адитивний білий гаусовий шум
АКФ - автокореляційна функція
АМ - амплітудна модуляція
АЦП - аналого-цифровий перетворювач
АЧХ - амплітудно-частотна характеристика
ЕІТЗ - Європейський інститут телекомунікацій та зв'язку
МСЕ - Міжнародний союз електрозв'язку
МШП - малошумний підсилювач
ВСШ - відношення сигнал / шум
ПК - персональний комп'ютер
ПЛІС - програмована логічна інтегральна схема
ПКР - програмно-кероване радіо
ЩРІ - щільність розподілу ймовірності
ПЧ - проміжна частота
ТС - телекомунікаційна система
ФНЧ - фільтр нижніх частот
ФОС - фільтр основної селекції
ФЧХ - фазочастотна характеристика
ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач
ЦОС - цифрова обробка сигналів
ЦСП - цифровий сигнальний процесор
ЧМ - частотна модуляція
ЕОМ - електронно-обчислювальна машина
BER - коефіцієнт бітових помилок
BPSK - двійкова фазова маніпуляція
EVM - величина вектора помилки
FSK - частотна маніпуляція
GSM - глобальна система мобільного зв'язку

IEEE - Інститут інженерів з електротехніки та електроніки

IP - початкова точка введення

QAM - квадратурна амплітудна модуляція

QPSK - квадратурна фазова маніпуляція

SER - коефіцієнт помилок символу

UMTS - Універсальна система мобільного зв'язку

VISA - Архітектура програмного забезпечення віртуальних інструментів

ФІРЕН

ТКСТБ

ВНТУ

ВСТУП

Актуальність теми. В даний час значна кількість сучасних мереж, систем і пристроїв телекомунікацій, включаючи професійні та спеціальні [1, 2], базові станції систем радіодоступу [3], аматорське радіо [4] виконуються з використанням технології програмно-обумовленого радіо (ПОР).

Дана технологія відкриває широкі можливості для внесення змін, поліпшення параметрів і впровадження додаткових функцій. До них відносяться алгоритми оцінки якості передачі інформації і алгоритми ідентифікації викривлень, які можуть вбудовуватися в розроблене обладнання і навіть устаткування, яке вже знаходиться в експлуатації [5].

Незважаючи на ускладнення систем передачі інформації і застосування все більш складних видів модуляції класичні квадратурні види цифрової модуляції, такі як BPSK, QPSK, QAM-4, QAM-16, не втрачають своєї актуальності і стійко зберігають певний спектр застосування. Зокрема, це має місце, коли немає необхідності в високошвидкісній передачі інформації, а потрібно забезпечити максимально стійку її передачу з прийнятною швидкістю і мінімумом випромінюваної потужності, наприклад, в висхідній лінії системи радіодоступу.

В таких умовах метрики оцінки якості, випромінюваного в ефір і прийнятого радіосигналів, починають грати все більш важливу роль. Саме від їх якісної і стабільної роботи буде залежати вибір типу модуляції, частоти несучої, кількості ортогональних несучих або будь-якого іншого параметра в високоінтелектуальній телекомунікаційній системі (ТС).

Розглянемо основні метрики, що використовуються в даній роботі.

Modulation Error Ratio [MER] - коефіцієнт помилок модуляції - відношення середньої потужності символу до усередненої потужності помилки. Error Vector Magnitude [EVM] - відносна помилка модуляції - відношення середньоквадратичного відхилення вектора помилки до середньої амплітуди квадратурного радіосигналу, виражене у відсотках.

Дані метрики застосовуються в багатьох діючих стандартах сучасних систем зв'язку [4, 6, 8] або ж використовуються при тестуванні телекомунікаційного обладнання в вимірювальних системах [6, 7, 9]. Крім метрик оцінки якості радіосигналу широкого поширення набули алгоритми сліпий компенсації його спотворень. Дані алгоритми засновані на статистичному аналізі радіосигналу.

Основним недоліком класичних метрик оцінки якості радіосигналу є те, що вони дають інформацію тільки про ступінь його спотворення, а не про його причини, що ускладнює усунення впливу даного спотворення на телекомунікаційну систему. У свою чергу алгоритми сліпий компенсації призначені для компенсації строго певного типу спотворень радіосигналу і не ефективні в інших випадках.

Аналіз останніх досліджень. Основний внесок в дослідження даної тематики внесли колективи організацій, що розробляють стандарти для телекомунікаційних систем, таких як МСЕ, ЕІТС. Серед публікацій зарубіжних вчених можна виділити роботи М.Д. Маккінлі, А. Георгадіса, Т.Л. Дженсена, О. Мендози, А.К. Ванга, С. Фрейслебена, Б. Хемп, П. Строта [1-10]. У них наведені методики обчислення вектора помилок для основних видів модуляції і стандартів телекомунікаційних систем. Серед вітчизняних вчених необхідно відзначити роботи М.А. Дубова, Д.Д. Стоянова, Ю.В. Полянина, А.Л. Приорова, які зробили великий внесок у розробку алгоритмів нееталонного обчислення метрик оцінки якості цифрових радіосигналів [11-17].

Мета і завдання роботи. Метою даної кваліфікаційної роботи є виявлення і ідентифікація типів спотворень радіосигналів на тлі шумів для підвищення завадостійкості телекомунікаційних систем та збільшення ефективності та інформативності вимірювальних систем передачі цифрової інформації.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

1 Аналіз існуючих метрик і алгоритмів оцінки якості сигналу та виявлення можливих шляхів реалізації алгоритмів ідентифікації його спотворень.

2 Розробка алгоритмів ідентифікації різних типів спотворень для радіосигналів з квадратурної модуляцією.

3 Дослідження характеристик розроблених алгоритмів за допомогою статистичного моделювання.

Об'єктом дослідження є методи виявлення та ідентифікації лінійних і нелінійних спотворень радіосигналу, в тому числі і на тлі адитивного білого гаусового шуму (АБГШ).

Предметом дослідження є алгоритми виявлення та ідентифікації спотворень радіосигналу на основі аналізу поведінки вектора помилок і статистичних параметрів, що характеризують роботу телекомунікаційної системи.

Методи досліджень базуються на використанні: методи загальної теорії зв'язку, цифрової обробки сигналів, теорії ймовірностей і математичної статистики, широко використовувалися також методи комп'ютерного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів:

Розроблено алгоритм детектування і компенсації спотворення сигнального сузір'я BPSK на основі аналізу вектора помилок і статистичних характеристик ТЗ, основною особливістю якого є здатність компенсувати спотворення сузір'я сигналу BPSK на відміну від широко розповсюджених алгоритмів сліпої компенсації.

Розроблено методику ідентифікації типу спотворення радіосигналу з модуляцією QPSK - QAM-4, що дозволяє ідентифікувати і розрізняти такі спотворення, як амплітудний і фазовий розбаланс квадратур.

Розроблено методику ідентифікації спотворень радіосигналу QAM16, засновану на аналізі поведінки вектора помилок при передачі різних канальних символів.

Практичне значення.

1 Запропоновані алгоритм і методики дозволяють ідентифікувати тип спотворення радіосигналу в системі передачі цифрової інформації на тлі АБГШ,

що дозволяє отримати більш повну інформацію при вимірюванні параметрів телекомунікаційного обладнання і застосувати найбільш ефективний алгоритм компенсації спотворення. Зокрема, методика виявлення та ідентифікації спотворення сузір'я з BPSK модуляцією, забезпечує підвищення завадостійкості телекомунікаційної системи до 1,3 дБ в залежності від величини розбаланса квадратур. Запропонована методика ідентифікації типу спотворення сигналу з QPSK забезпечує розрізнення фазового розбаланса при його величині більше 10° і амплітудного розбаланса від 0,1 залежно від ВСШ. Запропонована методика ідентифікації типу спотворення сигналу з QAM-16 забезпечує можливість розрізнити фазовий і амплітудний типи розбаланса квадратур, зміщення сигнального сузір'я і його нелінійне спотворення при їх величині від більш ніж 5° , щодо квадратур більш 0,95 і зміщення більше 0,05 і зміщення більш 0,05 від квадратури / синфазної складової символу сузір'я з мінімальною енергією відповідно.

2 Ефективність розроблених алгоритмів виявлення та ідентифікації спотворень для радіосигналів з цифровими видами модуляції перевірена статистичним моделюванням з використанням сучасних програмних пакетів.

3 Запропоновані алгоритм і методики можуть бути використані в телекомунікаційних системах і пристроях, в тому числі і телеметричних, а також в системах автоматизації виробництва.

4 Розроблені програми, що дозволяють проводити аналіз і розрахунок чутливості радіоприймального тракту, а також визначати зміну чутливості при внесенні спотворень для цифрових видів модуляції.

Апробація роботи та її основні результати роботи проводилися на VIII Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем» (СПРН-2021) у 2021 році.

1 ПАРАМЕТРИ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ РАДІОСИСТЕМ

1.1 Технологія програмно-керованого радіо і основні концепції її розвитку

В даний час системи передачі цифрової інформації продовжують активно удосконалюватися. Регулярно з'являються нові стандарти систем передачі інформації, модернізується обладнання систем і мереж передачі даних, розширюється функціонал і зручність для користувача пристроїв. Незважаючи на ускладнення систем передачі інформації і застосування все більш складних видів модуляції класичні види модуляції, такі як бінарна фазова маніпуляція, QPSK / QAM-4, QAM-16 не втрачають своєї актуальності і стійко зберігають певний спектр застосування. Зокрема, коли немає необхідності в високошвидкісній передачі інформації, а потрібно забезпечити максимально стійкий радіоканал для передачі цифрової інформації з прийнятною швидкістю передачі і мінімумом випромінюваної потужності. Таким прикладом може служити висхідна лінія передачі інформації мережі радіодоступу.

В таких умовах метрики оцінки якості випромінюваного в ефір і прийнятого радіосигналів починають грати все більш важливу роль. Саме від їх якісної і стабільної роботи буде залежати вибір типу модуляції, робочої частоти, кількості ортогональних несучих або будь-якого іншого параметра в високоінтелектуальній системі передачі цифрової інформації. Крім метрик оцінки якості радіосигналу широкого поширення набули алгоритми сліпий компенсації його спотворень. Дані алгоритми засновані на статистичному аналізі радіосигналу.

Основними недоліками класичних метрик оцінки якості радіосигналу є те, що вони дають лише інформацію про ступінь спотворення радіосигналу, а не про його причини, що ускладнює усунення впливу даного спотворення на ТЗ. У свою чергу, алгоритми сліпий компенсації призначені для компенсації чітко визначеного типу спотворення радіосигналу і не ефективні в інших випадках.

У даній роботі запропоновано алгоритми, що базуються на вже стали класичними метриках оцінки якості радіосигналів з цифровою модуляцією векторі помилок і модуляційної помилку, а також статистичному аналізу. Запропоновані алгоритми дозволяють в широкому діапазоні значень відносини сигнал-шум і величин спотворення радіосигналу визначати тип цього спотворення з високою ймовірністю. Дане рішення дозволяє отримати важливі для практичного застосування відомості, наприклад, точно визначити вузол системи передачі інформації, який вносить спотворення, а в окремих випадках, і компенсувати внесені спотворення, що недоступно в поточний момент часу для інших широко поширених алгоритмів. Крім того, інформація про тип впливає на радіосигнал спотворення може бути використана в системах автоматичного регулювання обладнання на виробництві, наприклад, з метою підвищити автономність даних комплексів.

Також впровадження деяких елементів даної роботи в навчальний процес показало позитивний результат в області поліпшення розуміння учнями основ цифрових систем передачі інформації, метрик оцінки якості та статистичних методів дослідження, застосовуваних в проектуванні ТС.

Дана технологія проектування телекомунікаційних пристроїв набула широкого поширення і на поточний момент є однією з найбільш перспективних [5, 6, 8]. В рамках даної концепції можна виділити кілька основних напрямків, які будуть розглянуті нижче [5].

Існує кілька загальноприйнятих концепцій реалізації пристроїв, заснованих на технології програмно-обумовленого радіо.

Ідеальний випадок. Концепція, в якій між АЦП (ЦАП) і антеннофідерним трактом немає ніяких додаткових пристроїв рисунок 1.1, за винятком підсилювачів і узгоджувальних пристроїв. В цьому випадку всі стадії обробки радіосигналу (квадратура перенесення, фільтрація, різного роду предискаженія, демодуляція) виробляються в цифровій формі [13, 16].

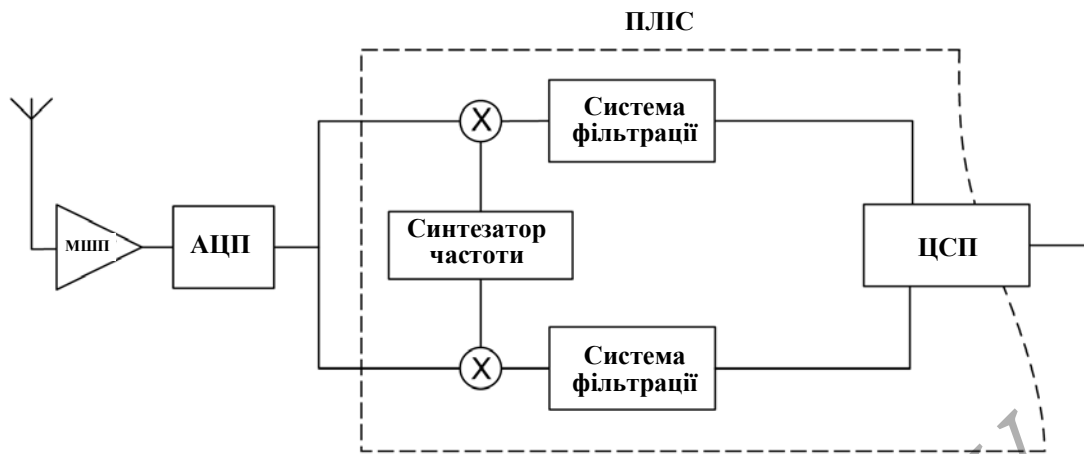


Рисунок 1.1 – Блок-схема ідеальної реалізації технології програмно-обумовленого радіо

У схемі реалізації з оцифруванням з проміжної частоти (рисунок 1.2) всі операції з високочастотним радіосигналом (преселекція, гетеродинування) виробляються в аналоговому тракті пристрою.

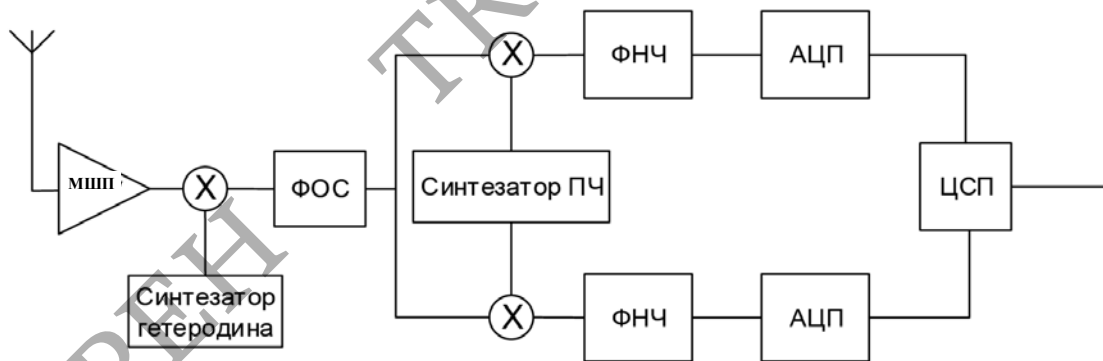


Рисунок 1.2 – Блок-схема реалізації технології програмно-обумовленого радіо з аналоговим перенесенням радіосигналу на проміжну частоту

Аналого-цифрове перетворення відбувається в тракті проміжної частоти і подальші операції (квадратурне перенесення радіосигналу на нульову частоту, фільтрація та обробка) відбуваються в цифровій формі [17].

Цифрова обробка сигналу на нульовій частоті. Радіосигнал переноситься і розділяється на квадратурні складові в аналоговому вигляді (рисунок 1.3), після чого проводиться аналого-цифрове перетворення і його подальша обробка, що дозволяє забезпечити вимоги електромагнітної сумісності, а також в повній мірі розкрити весь потенціал цифрової обробки радіосигналів [17, 22] .

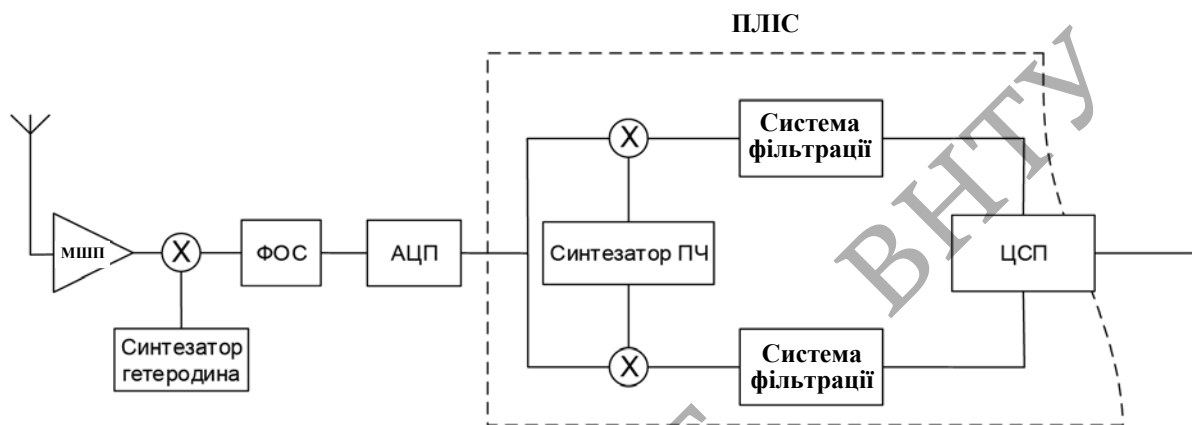


Рисунок 1.3 – Блок-схема реалізації технології програмно-обумовленого радіо з аналоговим перенесенням радіосигналу на низьку частоту

Найбільшого поширення в даний момент отримали концепції оцифровки з проміжної частоти і оцифровки з нульової частоти. Основними причинами такого вибору розробників служать оптимальне співвідношення вартості і продуктивності в першому випадку і мінімальна вартість у другому відповідно [9].

Також варто відзначити, що все більш широке поширення набуває концепція розподіленого пристрою, коли радіомодуль і модуль обробки даних можуть бути розподілені в просторі і з'єднуватися локально-обчислювальною мережею або мережею інтернет [6, 7].

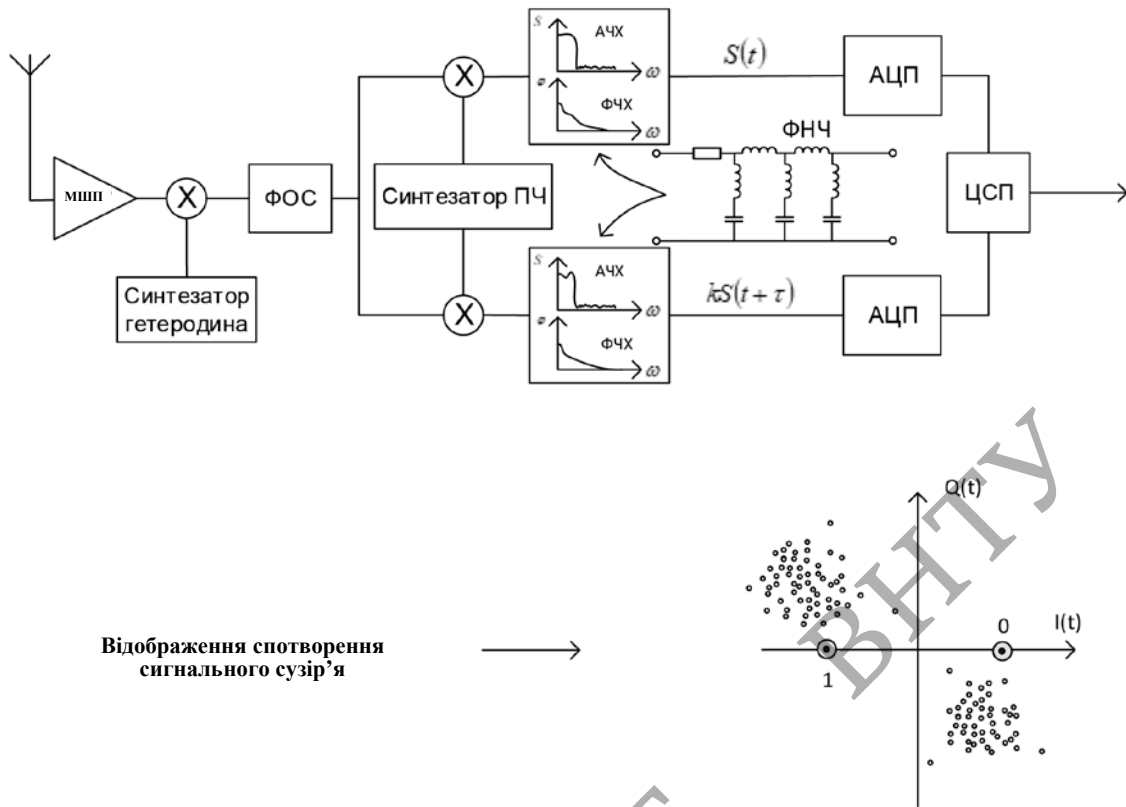
1.2 Основні причини виникнення спотворень радіосигналів в телекомунікаційних системах

При проходженні радіосигналу з цифровою модуляцією через щільну міську забудову виникає безліч різних спотворень, які негативно позначаються на завадостійкості ТС. З точки зору виявлення та ідентифікації при демодуляції фазоманіпулірованих радіосигналів найбільш складним є спотворення сигнального сузір'я в разі чотирьохпозиційної фазової маніпуляції (QPSK), що обумовлено відсутністю зниження потужності радіосигналу при погіршенні завадостійкості системи. Варто також відзначити, що причиною даного спотворення, крім особливостей поширення радіосигналу в складних умовах, може бути некоректна робота аналогового тракту радіоприймального пристрою.

Розглянемо одну з найбільш поширених схем побудови приймача радіосигналів з квадратурної модуляцією. Структурна схема цифрового приймача представлена на рисунку 1.4.

Перший блок після антени складається з малошумного підсилювача (МШП) і системи перенесення несучого коливання на проміжну частоту (ПЧ). Далі слід фільтр основної селекції (ФОС). Після фільтрації радіосигнал переноситься на нульову частоту за допомогою квадратурного демодулятора. Потім за допомогою фільтра нижніх частот (ФНЧ) пригнічується сумарна складова і відбувається перетворення радіосигналу в цифрову форму з використанням аналого-цифрового перетворювача (АЦП). На наступному етапі радіосигнал передається на цифровий сигнальний процесор (ЦСП) для подальшої обробки [2, 8].

Для досягнення високих параметрів радіоприймального пристрою необхідно, щоб система фільтрації володіла наступними характеристиками: високим рівнем придушення в смузі затримання, мінімальної нерівномірністю АЧХ в смузі пропускання, малою шириною перехідної смуги. Перераховані характеристики властиві аналоговим фільтрам високих порядків [7].



Відображення спотворення
сигнального сузір'я

Рисунок 1.4 – Структурна схема цифрового приймача

Високий порядок аналогового фільтра (рисунок 1.5) хоча і дає можливість отримати якісну АЧХ (рисунок 1.6), але тягне за собою використання великої кількості радіоелектронних компонентів, номінальні характеристики яких мають певні допуски. Крім того, багато радіоелектронні компоненти схильні до впливу часу, що призводить до зміни їх номінальних характеристик. Дані обставини можуть призводити до зниження ідентичності радіочастотних трактів синфазної і квадратурної складових сигналу і проявлятися у вигляді різних спотворень сигнального сузір'я.

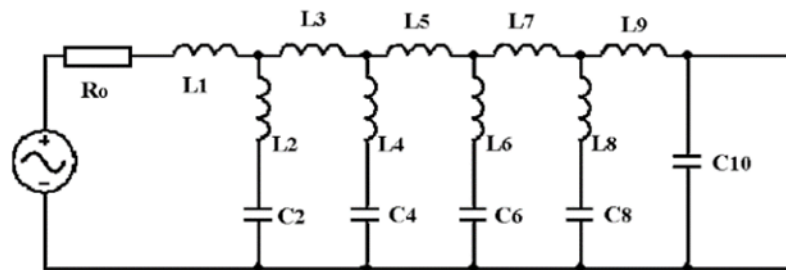


Рисунок 1.5 – Принципова електрична схема аналогового фільтра високого порядку в середовищі Filter Solutions

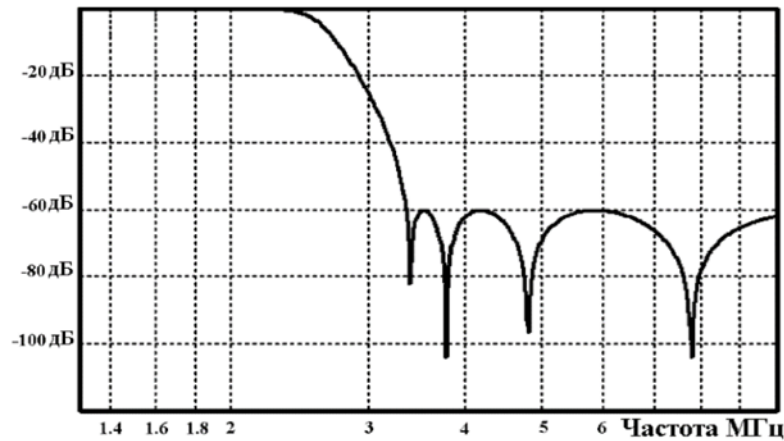


Рисунок 1.6 - Амплітудно-частотна характеристика аналогового фільтра високого порядку в середовищі Filter Solutions:

Наприклад, на проміжній частоті, рівній 1 МГц, відмінність постійних часу $\Delta\tau = 0,25 \text{ мкс}$ призведе до розбалансу, рівному $\frac{\pi}{4} \text{ рад}$ і повороту сигнального сузір'я на $\frac{\pi}{8} \text{ рад}$.

1.3 Квадратурна обробка сигналів в контексті програмно-керованого радіо

У даній роботі розглядаються алгоритми спотворень для сигналів з цифровою модуляцією (маніпуляцією). Сигнали з модуляцією QPSK-QAM4 і QAM-16 є різновидом сигналів з квадратурної модуляцією, сигнал з модуляцією BPSK є виродженим випадком, оскільки його можна представити як квадратура сигнал з нульовою квадратурної складової.

Розглянемо основні принципи формування прийому сигналів з квадратурної модуляцією. Квадратура сигнал представляється у вигляді комплексної величини:

$$S(t) = A_Q \cos(\omega t) + jA_I \sin(\omega t)$$

Крім того, даний сигнал може бути представлений в експоненційній формі:

$$S(t) = A_E e^{j\omega t}$$

$$A_E = \sqrt{A_Q^2 + A_I^2}$$

Експонентну форму можна порівняти з поданням вектора в полярних координатах, в той час як запис в тригонометричній формі - з розкладанням сигнального вектора по ортогональному базису, це підкреслює зв'язок амплітуди експоненціального подання з реальною і уявною складовою тригонометричного.

На рисунку 1.7 зображена схема формування квадратурного сигналу.

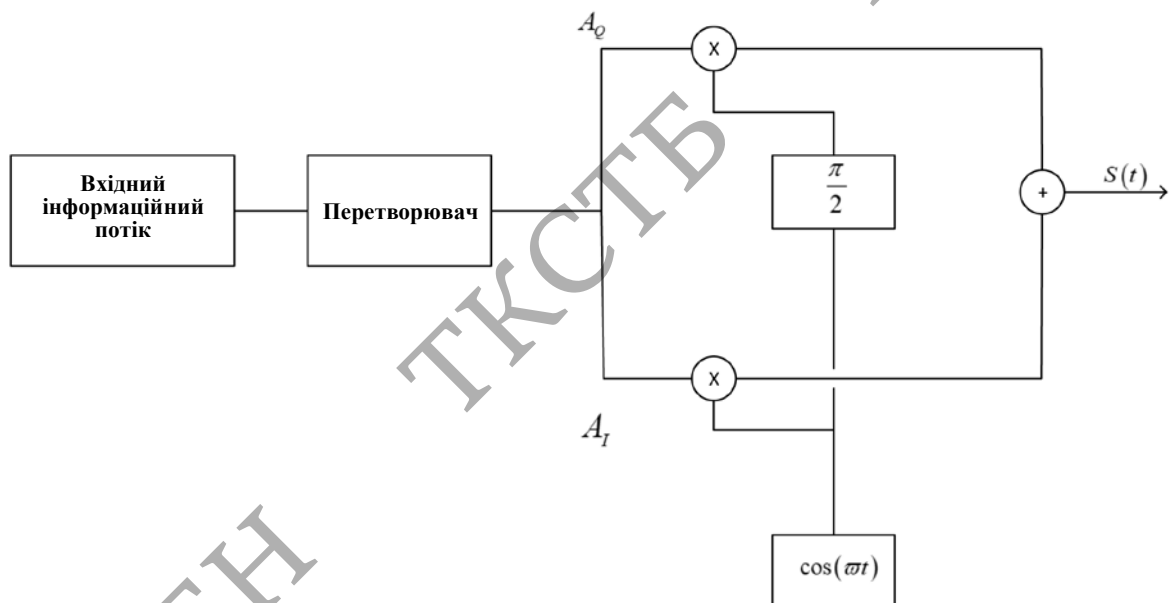


Рисунок 1.7 - Квадратурний модулятор

Для формування квадратурного сигналу використовується квадратура модулятор. Залежно від комбінації біт, що надходить від джерела інформації, встановлюються значення амплітуд синфазних і квадратурної складової, які визначають передається каналний символ. Далі відбувається їх перемноження з синфазною і квадратурною складовою, а потім їх складання, в результаті якого і формується комплексний сигнал.

На приймальній стороні відповідно розташований квадратура демодулятор (рисунок 1.8), який дозволяє виділити комплексну огибающую сигналу і отримати значення амплітуд синфазних і квадратурної складових сигналу, на основі яких можна зробити припущення про переданому каналному символі і зіставити йому відповідну комбінацію біт інформаційного сигналу.

Розглянемо тепер особливості реалізації схем прийому і формування квадратурних сигналів в контексті архітектури програмно-обумовленого радіо. У більшості випадків від пристроїв, побудованих за технологією ПОР, потрібна можливість приймати різні сигнали, включаючи їх аналогові види, а також частотно-модульовані сигнали, механізм формування яких відрізняється від сигналів з QAM або сигналів с PSK модуляціями. Для реалізації описаних раніше схем прийому і формування квадратурних сигналів необхідна реалізація двох паралельних трактів обробки сигналів, незалежно від того, з якої з концепцій архітектури ПОР виконано пристрій.

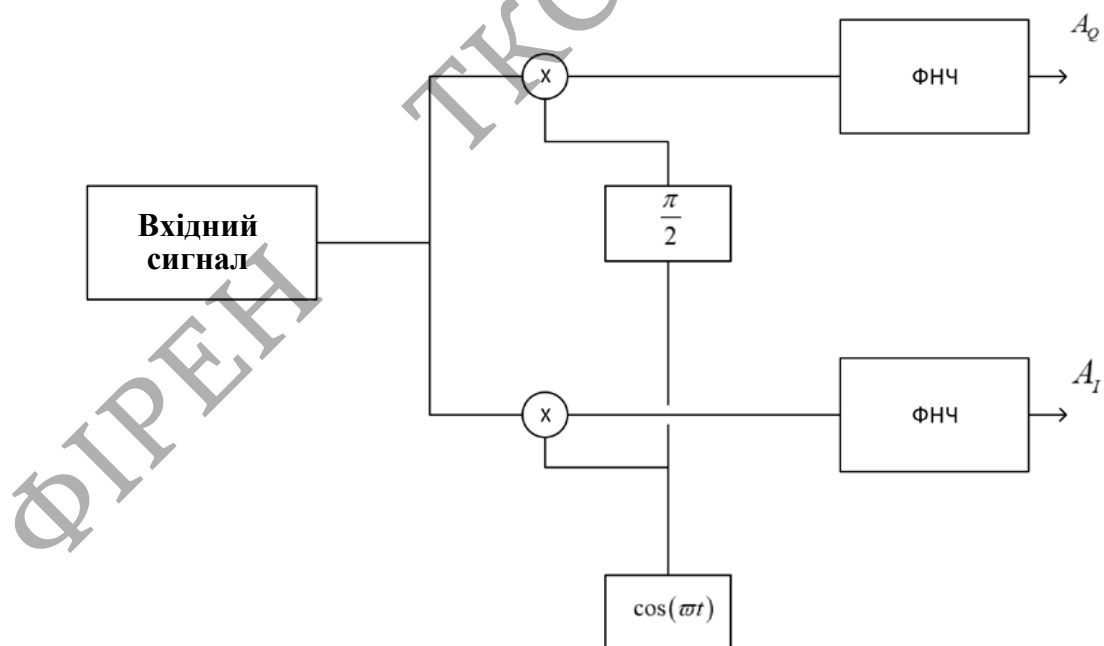


Рисунок 1.8 - Квадратурний демодулятор

У разі цифрової реалізації може бути отриманий варіант часового поділу квадратурних каналів при виконанні обчислень на одних і тих же фізичних

компонентах сигнального процесора або ПЛІС. Для демодуляції і формування аналогових сигналів такий метод може здатися непридатним і надлишковим, але в даному контексті квадратурний підхід до демодуляції аналогових сигналів забезпечує певні переваги.

Розглянемо квадратурну демодуляцію сигналу з амплітудною модуляцією. Відзначимо, що, незважаючи на свою простоту, даний тип модуляції продовжує активно використовуватися в морській зв'язку завдяки своїй високій спектральній і енергетичній ефективності, що забезпечує прийом даного сигналу на великих відстанях. На рисунку 1.9 представлено розташування вектора сигналу щодо синфазної і квадратурної компонент демодулятора на комплексній площині.

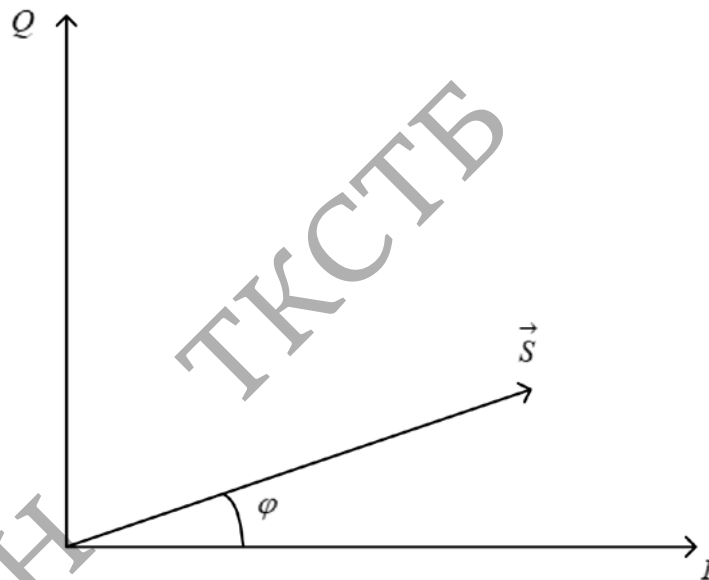


Рисунок 1.9 - Векторне відображення сигналу в квадратурних координатах

У разі виділення обвідної сигналу тільки в реальному області необхідно забезпечити стабільну фазову синхронізацію, оскільки різниця фаз сигналу буде визначати величину амплітуди проекції вектора на реальну складову. Будь-яка система фазової синхронізації є системою зі зворотним зв'язком, що призводить до ускладнення системи демодуляції. Нижче наведена формула, що виражає дану залежність:

$$S(t) = A_Q \cos(\varphi(t))$$

У разі ж квадратурного прийому даного сигналу з'являється можливість виділення комплексної обвідної, що прибере вплив різниці фаз гетеродина приймача і сигналу. Більш того, даний метод дозволить приймати сигнал навіть з розбіжністю частот гетеродина приймача і передавача, за умови, що переносимо сигнал пройде через фільтр основний селекції:

$$S(t) = \sqrt{\cos(\varphi(t))^2 + \sin(\varphi(t))^2} * \sqrt{A_Q^2 + A_I^2}$$

Варто відзначити, що існують також ефективні схеми квадратурної демодуляції частотно-модульованих сигналів, які дозволяють виробляти прийом і обробку не тільки аналогових сигналів, а й цифрових, наприклад з модуляціями FSK / GMSK. Нижче на рисунку 1.10 наведена одна з таких схем.

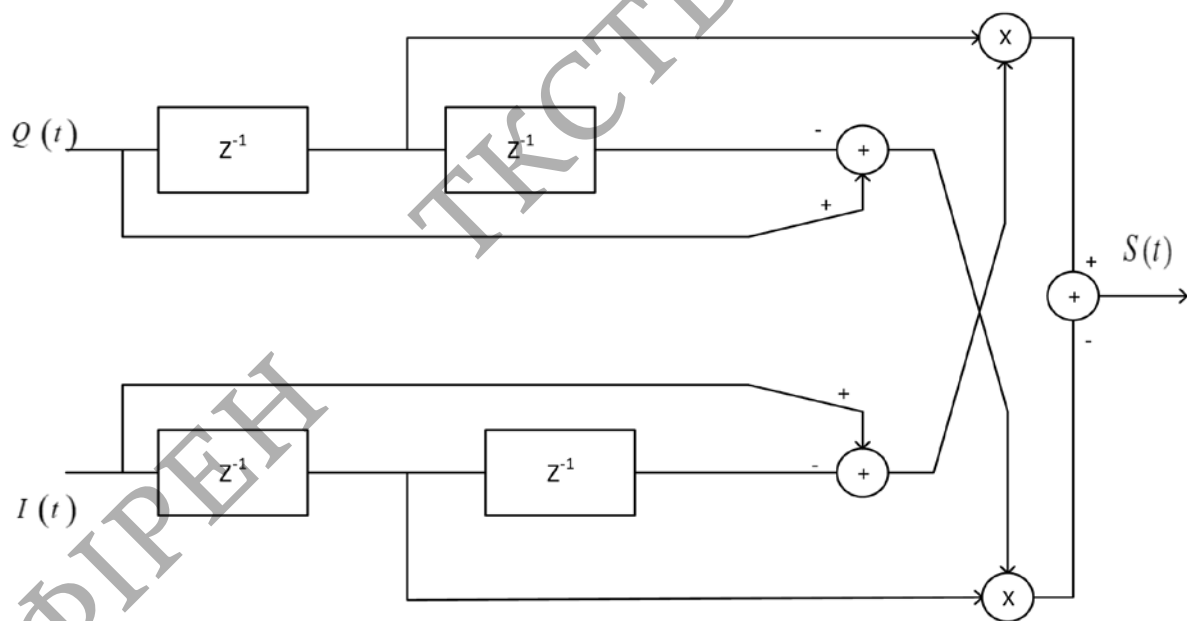


Рисунок 1.10 - Квадратурний демодулятор ЧМ сигналу

В цілому квадратурная обробка є одним з найбільш поширених методів прийому та формування сигналів на даний момент, зокрема в цифрових телекомунікаційних системах, реалізованих за технологією ПОР. Даний підхід дозволяє обчислювати метрики EVM / MER для більшості широко поширених

сигналів, включаючи цифрову частотну модуляцію, що робить його одним з найбільш актуальних на поточний момент часу.

1.4 Метрики оцінки якості радіосигналів з квадратурною модуляцією

В сучасних телекомунікаційних системах метрики оцінки якості та алгоритми компенсації спотворень грають важливу роль і є невід'ємною частиною даних систем [8].

Метрики оцінки якості радіосигналів можна класифікувати на дві основні категорії в залежності від типу інформації, яку несе в собі радіосигнал: метрики оцінки якості радіосигналів з аналоговою модуляцією і з цифровою модуляцією. Дана робота присвячена останнього типу.

У телекомунікаційних системах універсальним кінцевим критерієм якості роботи є ймовірність появи бітової помилки (Bit Error Ratio, BER). Для обчислення BER необхідне знання переданої інформації на приймальному боці, що знижує швидкість передачі даних в системі. Крім того, існує ряд випадків, таких як обчислення BER при високому співвідношенні енергії біта до спектральної щільності потужності, коли використання даного критерію для оцінки якості роботи телекомунікаційної системи вельми скрутно і вимагає передачі величезної кількості даних.

Безпосередньо для оцінки якості радіосигналу природними критеріями є відносини E_b/N_0 або E_s/N_0 , які відповідно показують ставлення енергії біта E_b або символу E_s до спектральної щільності потужності шуму N_0 . Дані метрики є історично першими, вони не відображають повною мірою специфіку квадратурних радіосигналів, але формально застосовні для їх оцінки. Найбільш відповідною квадратурних радіосигналах є міра відхилення точок сузір'я від своїх оригінальних положень [4, 7, 9]. Нижче наведені основні метрики подібного роду, які отримали найбільше поширення.

Modulation Error Ratio (MER) - коефіцієнт модуляційних помилок - виражене в децибелах відношення середньої потужності символу k середньої

потужності помилки [8, 9]. На рисунку 1.11 наведено приклад відхилення внаслідок впливу шуму прийнятого вектора з сигнального сузір'я, тут \vec{e} - вектор помилки, \vec{S} , \vec{S}' - оригінальний і спотворений вектори відповідно.

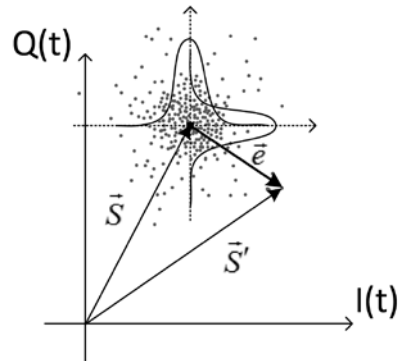


Рисунок 1.11 - Графічна інтерпретація вектора помилки при впливі на канальний символ АБГШ

Дана метрика може бути обчислена як для кадру, що складається з N символів, так і для окремого символу. Наведемо аналітичні записи MER для кожного випадку:

$$MER = 10 \lg \frac{\sum_{k=1}^N (I_k^2 + Q_k^2)}{\sum_{k=1}^n |\vec{e}_k|^2}$$

де I_k та Q_k - проєкції на синфазну і квадратурну вісь вектора \vec{S}_k , а квадрат модуля вектора помилки можна виразити таким чином:

$$|\vec{e}_k|^2 = (I_k - I'_k)^2 + (Q_k - Q'_k)^2$$

Для окремо взятого символу усереднена метрика MER прийме наступний вигляд:

$$MER_k = 10 \lg \frac{\sum_{i=1}^L (I_{ki}^2 + Q_{ki}^2)}{\sum_{i=1}^L |\vec{e}_{ki}|^2}$$

У даній роботі в якості основного критерію якості радіосигналу застосовується пов'язана з MER метрика - Error Vector Magnitude (EVM) - відносна помилка модуляції - відношення середньоквадратичного відхилення вектора помилки до середньої амплітуди квадратурного радіосигналу, виражене у відсотках [6, 10]. Запишемо його аналітичне представлення аналогічно MER для фрейма і усереднену метрику для окремого символу відповідно:

$$EVM = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N |\vec{e}_k|^2}{\sum_{k=1}^N (I_k^2 + Q_k^2)}} \cdot 100\%$$

$$EVM_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^L |\vec{e}_{ki}|^2}{\sum_{i=1}^L (I_{ki}^2 + Q_{ki}^2)}} \cdot 100\%$$

Варто відзначити, що, незважаючи на широке поширення в вимірювальній апаратурі, стандартах передачі інформації і системах моделювання, дані метрики не мають усталених назв, тому наведені інтерпретації взяті з [15].

Взаємозв'язок між метриками MER і EVM можна записати у вигляді:

$$MER[dB] = 10 \lg \frac{1}{EVM^2} = -20 \lg EVM$$

1.5 Еталонне і нееталонне обчислення метрик оцінки якості

Метрики оцінки якості радіосигналу з квадратурної модуляцією в залежності від умов експерименту, що проводиться або умов роботи телекомунікаційної системи можуть бути обчислені різними способами.

Еталонне обчислення метрики оцінки якості величини вектора помилок (рисунок 1.12) засновано на використанні зразка переданого сигналу - еталона. В даному випадку при обчисленні вектора помилок є результат демодуляції (м'якого рішення) прийнятого каналного символу, вихідний вектор, сформований на передавальній стороні. Ключовим моментів при еталонному способі обчислення метрики оцінки якості сигналу є те, що апріорно відомий результат, який необхідно отримати при прийнятті жорсткого рішення, що гарантує коректне обчислення метрики при будь-якому відхиленні вектора на приймальній стороні.

Нееталонне обчислення оцінки якості сигналу (рисунок 1.13) не передбачає використання будь-якої апріорної інформації про прийнятому сигналі. Проводиться демодуляція прийнятого каналного символу (м'яке рішення), після чого проводиться його детектування (прийняття жорсткого рішення), після чого обчислюється вектор помилки між ними. Особливості нееталонного підходу до обчислення метрик оцінки якості радіосигналів в телекомунікаційних системах описані в [15].

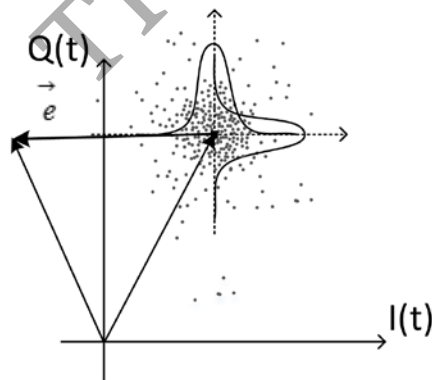


Рисунок 1.12 - Еталонний випадок обчислення вектора помилки при помилковому прийомі каналного символу під впливом АБГШ в каналі передачі інформації

Однією з ключових особливостей даного підходу є те, що при сильному відхиленні переданого символу в каналі передачі радіосигналу жорстке рішення про спочатку переданому векторі буде прийнято помилково. Оскільки в даному випадку обчислювач не має ніякої апріорної ймовірності про переданому

символі, величина вектора помилок буде обчислено на основі некоректно відновленого символу, що призведе до помилкового визначення його величини.

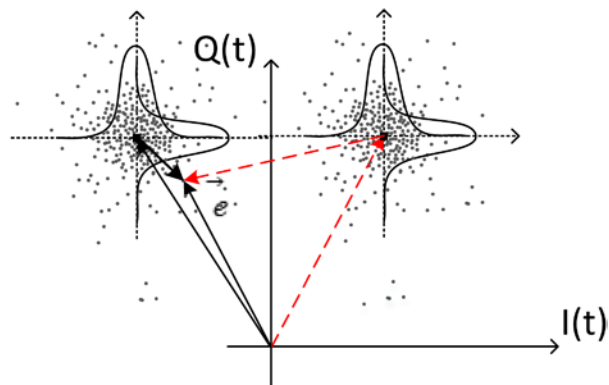


Рисунок 1.13 - Обчислення вектора помилки нееталонним методом при помилковому прийомі каналного символу під впливом АБГШ в каналі передачі інформації

Дана властивість нееталонного обчислення метрики EVM в телекомунікаційних системах не дозволяє успішно використовувати її при малих відносинах енергії біта до енергії каналного символу.

1.6 Висновки до розділу 1

Розглянуто популярні метрики оцінки якості радіосигналів з цифровою модуляцією. Зокрема, метрики, засновані на оцінці ступеня відхилення символних векторів в прийнятому сигнальному сузір'ї від заданих методом модуляції позицій: величина вектора помилок і коефіцієнт помилок модуляції. Дані метрики є природними для сигналів з цифровою модуляцією і якнайкраще характеризують ступінь спотворення прийнятого сигнального сузір'я. Проаналізовано основні причини спотворень сигнального сузір'я в телекомунікаційних системах. Розглянуто основні концепції розвитку і реалізації программноопределяемого радіо. Дана технологія продовжує активно розвиватися, і багато сучасних професійні засоби радіозв'язку побудовані з її

використанням. Пристрої, реалізовані за даною технологією, будуть основним майданчиком для впровадження результатів, отриманих в даній роботі.

Основними передумовами до проведення досліджень, представлених в роботі, з'явилися нездатність в чистому вигляді наведених вище метрик ідентифікувати причину погіршення завадостійкості телекомунікаційних систем і нездатність сліпих алгоритмів компенсації ефективно боротися з усіма типами спотворень.

У першому випадку, на виході блоку аналізу MER / BER / EVM виходять тільки цифри, що демонструють рівень завадостійкості ТС. У разі його погіршення дані метрики не дозволяють провести аналіз причин і усунути порушення в роботі ТС. Дослідження, наведені в роботі, спрямовані не стільки на оцінку якості роботи телекомунікаційної системи, скільки на ідентифікацію причин порушення її роботи, що дозволяє більш ефективно боротися з факторами, що знижують цю ефективність.

2 РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМУ ІДЕНТИФІКАЦІЇ І КОМПЕНСАЦІЇ СПОТВОРЕННЯ СУЗІР'Я РАДІОСИГНАЛУ З МОДУЛЯЦІЄЮ BPSK

В останні роки переважна більшість телекомунікаційних пристроїв в нашій країні виконувалося переважно на закордонній елементній базі. В даний час по ряду причин сталося різке подорожчання імпортованих електронних компонентів. Багато розробники для того щоб не втратити свою частку на ринку пішли по шляху використання електронних компонентів нижчого класу, відповідно з більш високим допуском на номінальні характеристики і діапазон їх зміни під впливом зовнішніх чинників і часу, що може призводити до різних спотворень радіосигналу.

З точки зору виявлення та ідентифікації при демодуляції фазоманіпульованих радіосигналів найбільш складним є поворот сигнального сузір'я, оскільки його вплив погіршує стійкість системи, в той час як відношення сигнал-шум (ВСШ) в смузі фільтра основний селекції залишається незмінним. Спотворення даного типу можуть проявлятися при проходженні радіосигналу з цифровою модуляцією через щільну міську забудову, а також можуть бути викликані некоректною роботою аналогового тракту радіоприймального пристрою [13].

Необхідно відзначити, що проведені в цьому розділі дослідження спрямовані на підвищення завадостійкості прийому сигналу з модуляцією BPSK. Розроблені рішення і алгоритми створювалися з урахуванням можливостей впровадження в існуючі та функціонують телекомунікаційні системи, обладнання яких побудовано за архітектурою програмно-обумовленого радіо.

2.1 Аналіз завадостійкості прийому при спотворенні сигнального сузір'я сигналу з модуляцією BPSK

Розглянемо стійкість сигналів з модуляцією BPSK. Нехай на радіосигнал в тракті передачі впливає АБГШ з нульовим математичним очікуванням, а співвідношення енергії біта до спектральної щільності потужності шуму в каналі передачі $\frac{E_b}{N_o}$ є заданою величиною [7].

Розглянемо сигнальне сузір'я BPSK в квадратурній площині. В даному випадку є дві точки, розташовані на відстані $\sqrt{E_s}$, від початку координат [2, 5], причому квадратурна складова дорівнює нулю. Використовуючи вираз, що визначає ймовірність появи бітової помилки при когерентній демодуляції сигналу [2, 8]

$$BER = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}} \right) \right]$$

де $\operatorname{erfc}(x)$ - функція помилок Лапласа, можна визначити BER для випадку спотворення, вплив якого проявляється вигляді повороту сигнального сузір'я навколо початку координат. Тоді вираз, що визначає BER, буде модифіковано таким чином:

$$BER_{dist} = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erfc} \left(\cos(\varphi) \sqrt{\frac{E_b}{N_o}} \right) \right]$$

На рисунках 2.1 і 2.2 показано вплив спотворення на сигнальне сузір'я, в результаті чого зменшується перешкодозахищеність приймача [5]. Тут \hat{s} - прийнятий символ в квадратурній площині, а μ та σ - відповідно дисперсія і математичне очікування впливаючого на систему АБГШ.

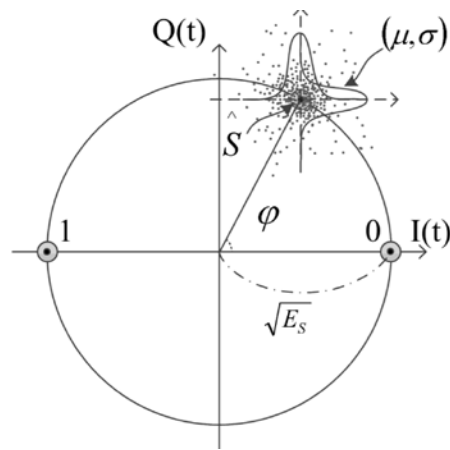


Рисунок 2.1 - Вплив спотворень на сигнальне сузір'я – вплив АБГШ

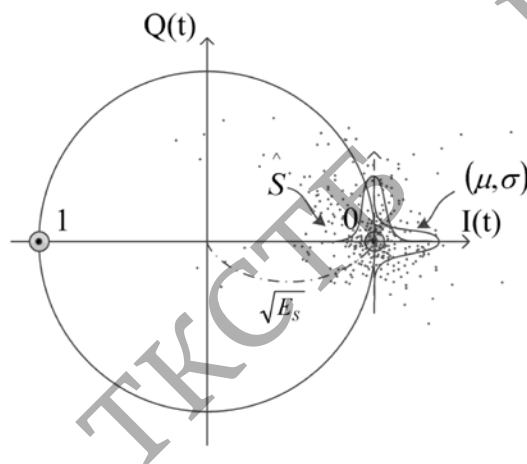


Рисунок 2.2 - Вплив спотворень квадратур на сигнальне сузір'я - одночасний вплив АБГШ і спотворення сузір'я

2.2 Алгоритм ідентифікації спотворення і його компенсації

Розглянемо алгоритм виявлення та усунення впливу повороту сигнального сузір'я, заснований на застосуванні двох метрик: еталонної метрики оцінки шумового впливу по пілот-сигналу і нееталонної метрики аналізу вектора помилок. Блок-схема зазначеного алгоритму приведена на рисунку 2.3.

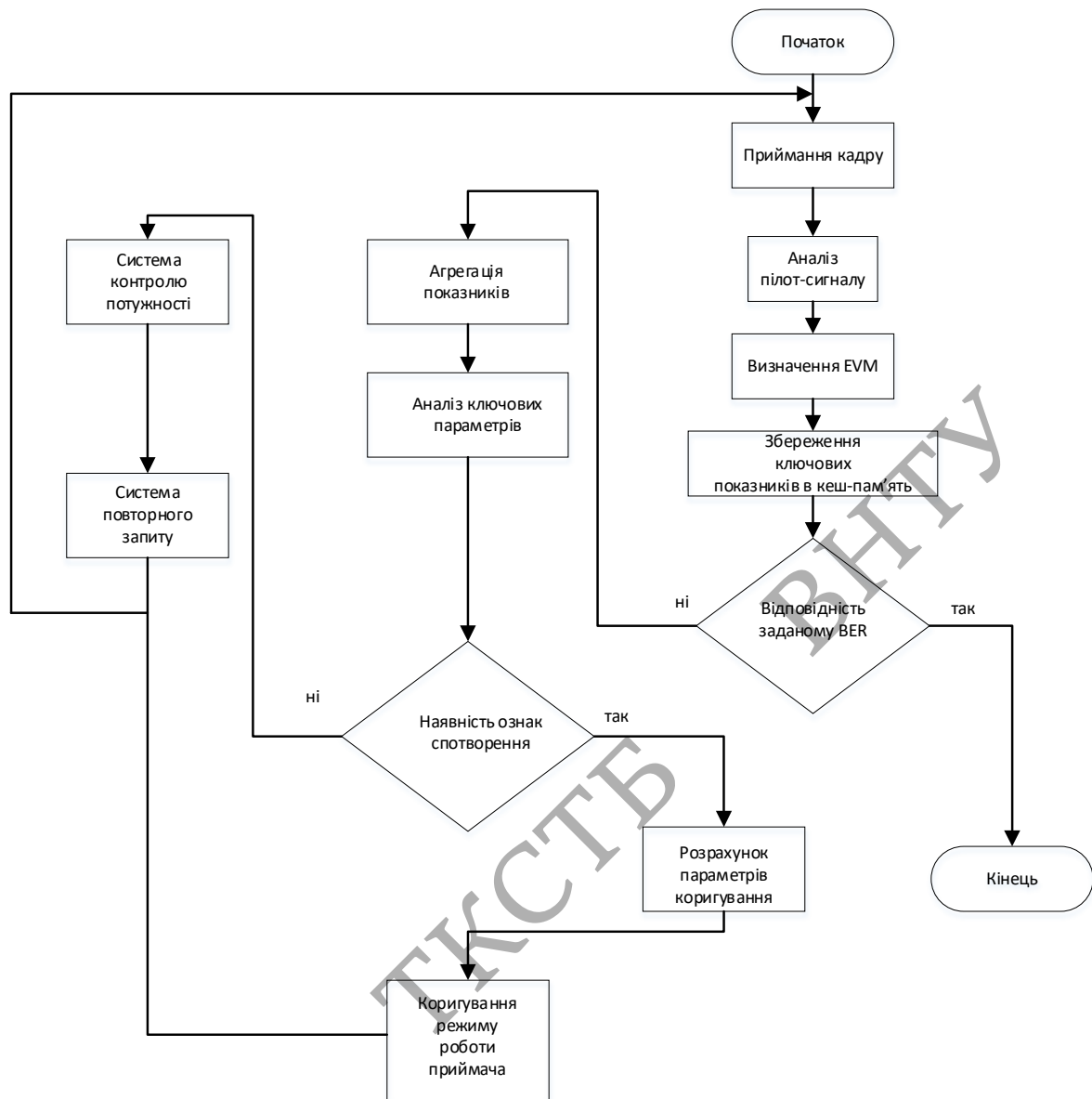


Рисунок 2.3 - Блок-схема алгоритму визначення впливу спотворень і активації системи компенсації

Після прийому кадру проводиться оцінка пілот-сигналу. Якщо він прийнятий задовільно, то алгоритм передає інформацію для подальшої обробки [2], при цьому виробляється обчислення вектора помилки, а показники зберігаються в буфері. В іншому випадку, аналогічно нагоди успішного прийому кадру, проводиться обчислення вектора помилок і збереження показників в буфері. Основною відмінністю тут є запуск алгоритму аналізу поведінки величини вектора помилок як на інтервалі прийнятого кадру, так і на більш

тривалому інтервалі за рахунок накопиченої в буфері статистики. Дана міра пояснюється специфікою впливу різних спотворень на завадостійкість прийому, а також різної методикою їх виявлення і компенсації. У разі багаторазового послідовного отримання пакету з показниками EVM, що свідчать про вплив АБГШ, приймається рішення про задіявання петлі контролю потужності, в разі її наявності в ТЗ, з метою підвищення ВСШ в каналі передачі інформації. В іншому випадку, якщо приймаються пакети з відсутністю ознак в поведінці вектора помилок, що сигналізують про необхідність збільшення ВСШ в каналі, але BER продовжує перевищувати допустимий поріг, проводиться аналіз інформації, накопиченої в буфері. На наступному етапі робиться висновок про наявність чи відсутність розбаланса квадратур або спотворення сузір'я в системі передачі інформації.

2.3 Особливості роботи алгоритму компенсації

Розглянемо більш докладно особливості роботи даного алгоритму. Після посимвольного прийому дискретного повідомлення на виході демодулятора є значення I і Q компонент прийнятого символу \hat{S}_i , які зберігаються в буфері у вигляді наступних структур:

$$\hat{S}_i = \{I_i; Q_i\}$$

На наступному етапі проводиться накопичення елементів S_i , які можуть бути отримані як з одного кадру, так і агреговані з декількох. Після накопичення кадру необхідної довжини відбувається нормування вектора помилок на середню потужність прийнятого сигналу та обчислення усередненого вектора помилки. Коефіцієнт нормування може бути записаний у такий спосіб:

$$A = \sqrt{\left(\sum_{i=0}^k \frac{\hat{P}(S_i)}{M} \right)^{-1}}$$

де M - порядок модуляції, $P(\hat{S}_i)$ - енергія прийнятого символу, k - розмір кадру [6, 9]. Оскільки всі символи сигналу BPSK мають однакову енергію, розбаланс квадратур по фазі призведе до повороту сигнального сузір'я щодо початку координат на величину, рівну половині фазового розбаланса, без будь-яких додаткових спотворень. Отже, знаючи величину вектора помилки і коефіцієнт нормування, можна компенсувати спотворення сузір'я:

$$\varphi(k) = \arccos\left(\frac{1}{2} A \overline{EVM}(k) - \sqrt{\overline{E_s}}\right)$$

де k - розмір кадру, на якому обчислений вектор помилок, $\overline{E_s}$ - усереднена енергія символу, \overline{EVM} - усереднене значення вектора помилок, обчислене при прийомі кадру довжиною 1024 біта. Взаємозв'язок даних величин додатково проілюстрована на рисунку 2.4.

На рисунках 2.5 і 2.6 приведені результати роботи алгоритму для величин кута повороту $\frac{\pi}{6}$ рад та $\frac{\pi}{3}$ рад, при величині кадру, на якому обчислюється вектор помилки, рівної 1024 біта.

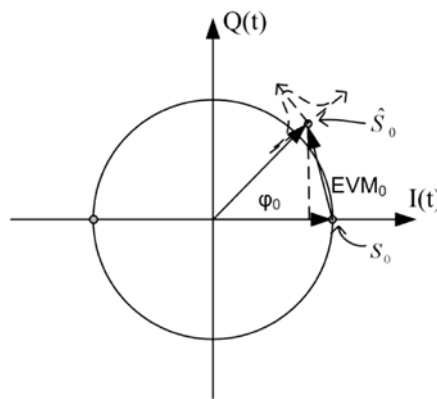


Рисунок 2.4 - Визначення величини кута повороту при впливі на нього спотворення, на основі використання нормованої на середню потужність сузір'я величини вектора помилок

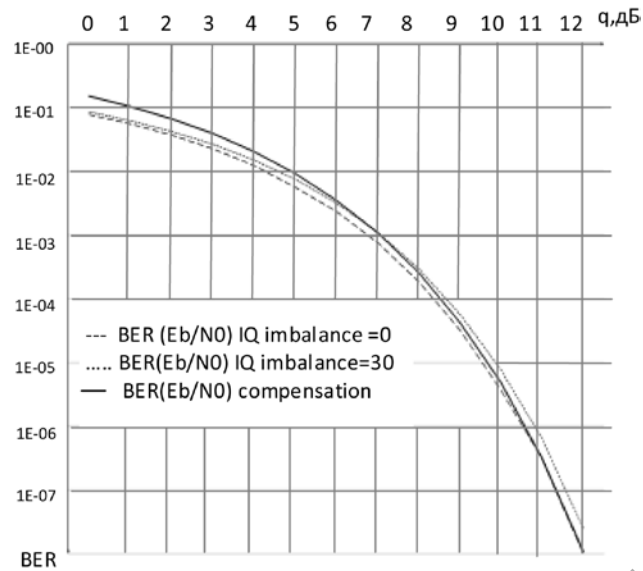


Рисунок 2.5 - Робота алгоритму компенсації для заданого кута повороту

сигнального сузір'я $\frac{\pi}{6}$ рад

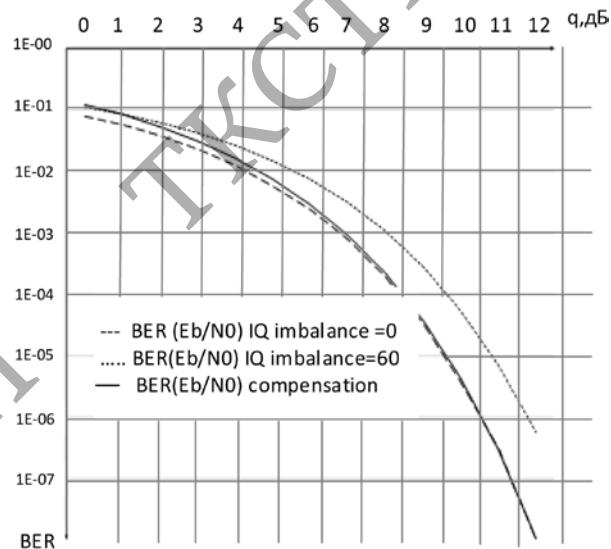


Рисунок 2.6 - Робота алгоритму компенсації для заданого кута повороту

сигнального сузір'я $\frac{\pi}{3}$ рад

Тут пунктирною лінією з великим штрихом зображена залежність ймовірності появи бітової помилки від співвідношення E_b/N_0 , дрібним

пунктиром - при впливі спотворення, суцільною лінією - при роботі алгоритму компенсації.

Виходячи з представлених графіків, можна зробити висновок, що при низьких ВСШ в каналі передачі алгоритм компенсації не функціонує належним чином, оскільки вектор помилки обчислюється нееталонно, отже, в тому випадку, коли символ прийнятий помилково, в обчислення EVM буде внесена похибка незалежно від розміру кадру, на якому нормується і обчислюється вектор помилки [9].

Визначимо поріг відношення E_b/N_0 в каналі передачі, при якому алгоритм компенсації починає давати вигоду для різних величин кута повороту сузір'я. Графік відповідної залежності представлений на рисунку 2.7.

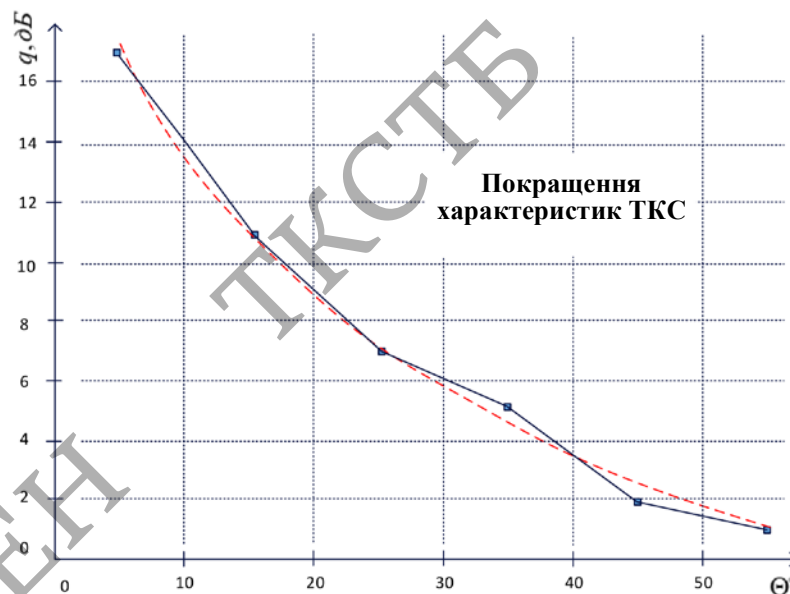


Рисунок 2.7 - Діаграма, що характеризує область ефективної роботи запропонованого методу компенсації, що спотворює вплив

Щоб забезпечити максимально ефективну роботу алгоритму компенсації, не погіршуючи поточні параметри системи передачі, необхідно розробити метод аналізу радіосигналу, що дозволяє активувати алгоритм компенсації в області його ефективної роботи. Варто зазначити, що аналіз пілот-сигналу не дозволяє

диференціювати вплив повороту сузір'я [7, 8, 12]. На рисунках 2.8 і 2.9 приведені два сузір'я, одне з яких спотворено, при ВСШ в каналі передачі 9,2 дБ, друге - без спотворень, але ВСШ в каналі передачі одно 7,6 дБ. В обох випадках ймовірність появи бітової помилки однакова і дорівнює $1,9 \cdot 10^{-4}$.

Для того щоб вирішити задачу розрізнення впливу АБГШ і повороту сигнального сузір'я, розглянемо поведінку величини вектора помилки EVM. На блок-схемі, наведеній на рисунку 2.2, в разі невідповідності BER заданим вимогам, проводиться обчислення EVM і збереження показників в буфері.

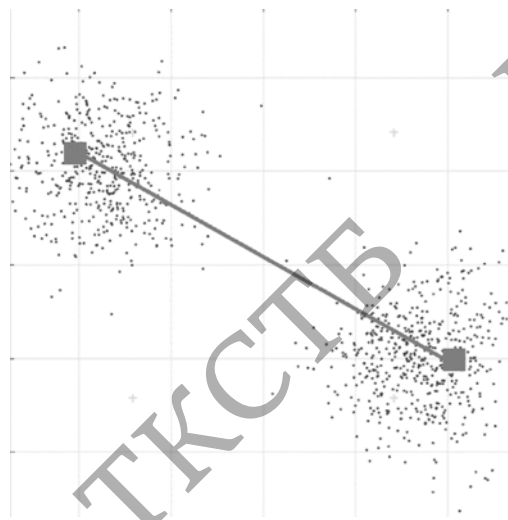


Рисунок 2.8 - Сигнальне сузір'я, спотворене в результаті повороту

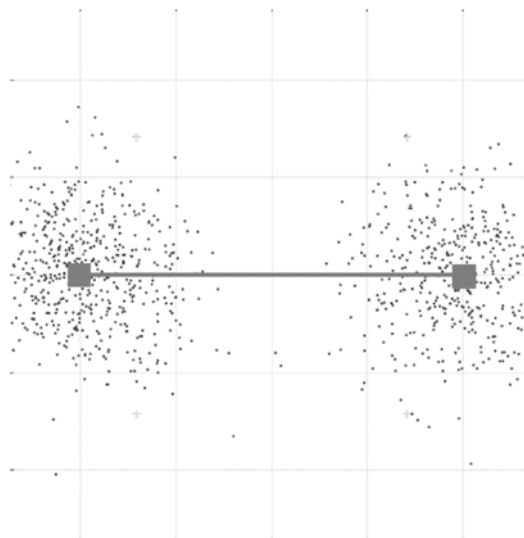


Рисунок 2.9 - Сигнальне сузір'я, спотворене в результаті впливу АБГШ

За допомогою правила Стерджеса [7, 9] наявні в буфері дані розбиваються на інтервали, величина яких визначається наступним виразом:

$$l = \frac{\overline{EVM}_{max} - \overline{EVM}_{min}}{1 + \log_2(k)}$$

\overline{EVM}_{max} та \overline{EVM}_{min} - максимальна і мінімальна величина усередненого вектора помилки, обчисленого при обробці кадру, довжина якого дорівнює 1024 біта, k - розмір кадру.

На наступному етапі відбувається підрахунок кількості влучень значень в буфері в кожен з інтервалів L_i , абсолютні значення кордонів якого визначаються наступним виразом:

$$L_i = \left\{ \overline{EVM}_{min} + li, \right. \\ \left. \overline{EVM}_{min} + l(i+1) \right\}$$

Графічна інтерпретація даного процесу представлена на рисунку 2.10, де зліва зображено сигнальне сузір'я, при прийомі якого проведена агрегація показників, а праворуч гістограма значень \overline{EVM} по інтервалах L_i . Дані інтервали виражені у відсотках, де по осі абсцис за 100% прийнята величина, рівна $\sqrt{E_s}$, а по осі ординат кількість віддіків, що потрапили в інтервал.

У тому випадку, якщо сигнальне сузір'я піддається спотворення при незначному впливі АБГШ, медіана розподілу, представленого на гістограмі, буде зміщена пропорційно величині викривлення, в той час як розкид щодо неї буде незначним. В іншому випадку буде спостерігатися зворотна картина - значний розкид по заданому порозу при мінімальному зсуві, оскільки за умовами моделювання математичне очікування впливає на радіосигнал шуму дорівнює нулю [7].

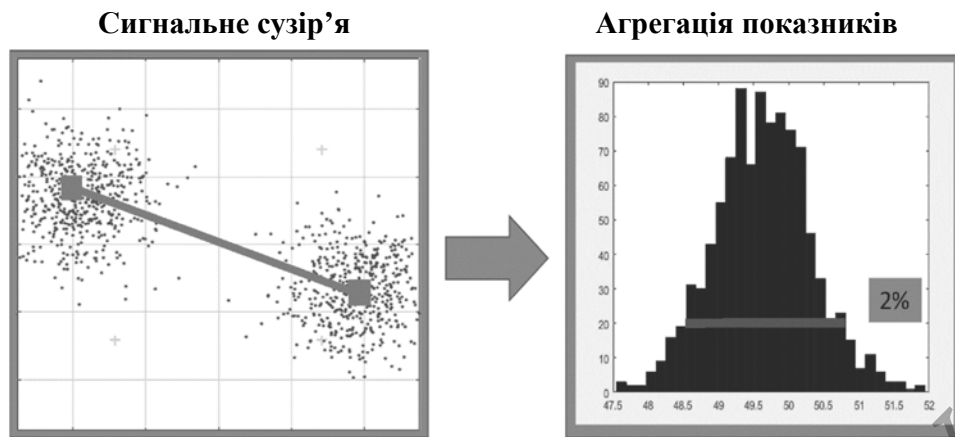


Рисунок 2.10 - Агрегація показників (розмір кадру 1024 біта, 1000 кадрів)

2.4 Приклад роботи системи компенсації спотворення сигнального сузір'я BPSK

Розглянемо роботу системи компенсації, розрахованої на рішення наступного завдання: мінімізація впливу повороту сигнального сузір'я, починаючи з $\frac{\pi}{6}$ рад і співвідношення E_b/N_0 , рівного 6 дБ. В результаті серії експериментів обраний наступний критерій активації: алгоритм компенсації задіюється в разі перевищення 2% розкиду по частоті потрапляння відліків в інтервал, рівний 20. На рисунку 2.11 представлена діаграма роботи алгоритму аналізу стану каналу і компенсації спотворення сигнального сузір'я для наступних вихідних даних: поріг BER дорівнює 10^{-5} [7], довжина кадру, на якому обчислюється вектор помилки, дорівнює 1024 біта, кількість кадрів, за якими ведеться агрегація статистичних даних, дорівнює 1000.

Розглянемо представлену діаграму більш детально, відповідно із блок-схемою роботи алгоритму, зображеної на рисунку 2.2. Якщо при аналізі пілот-сигналу досягається заданий рівень BER, то проводиться прийом і обробка повідомлення без будь-яких додаткових маніпуляцій.

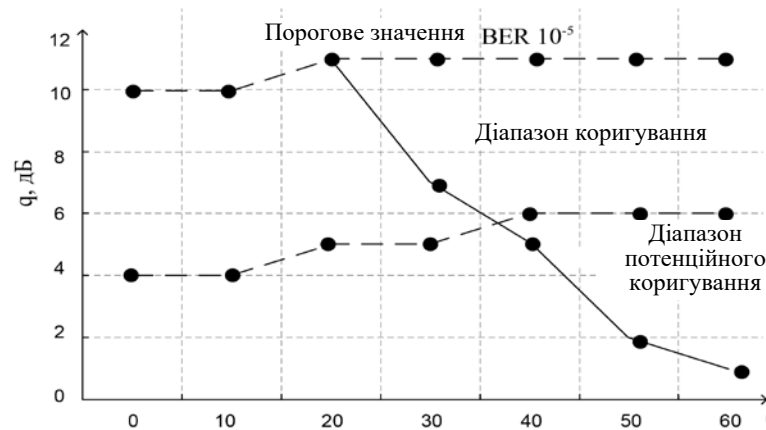


Рисунок 2.11 - Діаграма роботи алгоритму детектування спотворення і його компенсації

Крива граничного значення BER в залежності від ступеня спотворення сузір'я і відношення E_b/N_0 представлена верхньою пунктирною лінією. Суцільною лінією розділені область ефективної роботи системи компенсації (праворуч) і область внесення незначних спотворень (зліва). Нижньої пунктирною лінією представлено виконання умови активації системи компенсації. В результаті можна виділити три основні області роботи алгоритму: область поліпшення показників роботи ТС, область внесення спотворень і область потенційного поліпшення, в якій можливе поліпшення показників роботи системи передачі інформації без активації алгоритму компенсації.

Основним напрямком розвитку і вдосконалення запропонованого алгоритму є розробка більш досконалого критерію активації алгоритму компенсації і методики агрегації статистичних даних з метою охоплення області потенційного поліпшення характеристик системи і мінімізації області внесення спотворень. Слід також виділити шляхи розвитку робіт в даній області в цілому - розробка алгоритмів для більш складних видів маніпуляцій (QPSK, QAM-16 та ін.), Які можуть бути схильні до впливу більш складних, комплексних видів спотворень на відміну від BPSK сигналів. В даному випадку основним завданням

буде визначення типу спотворення, що впливає на ТЗ, наприклад розбаланса квадратур від компресійного спотворення в умовах впливу на систему АБГШ.

2.5 Висновки до розділу 2

Розроблено алгоритм, який діє на основі комплексної оцінки якості радіоканалу передачі інформації і дозволяє детектувати наявність спотворень в сигнальному сузір'ї, вплив яких не виявляється як зниження потужності радіосигналу, але серйозно погіршує характеристики ТЗ. Як метрики оцінки якості сигналу в запропонованому алгоритмі використовується несталонно обчислений вектор помилок.

Даний алгоритм дозволяє не тільки розрізнити вплив АБГШ і спотворення сузір'я, а й компенсувати їх за допомогою аналізу вектора помилок за рахунок відмінностей в поведінці даної метрики при впливі на сигнал спотворюючих впливів різної природи.

Область роботи алгоритму, в якій вносяться поліпшення, обмежена зверху значенням ВСШ, рівним 11 дБ (пороговим значенням вимоги до помилки в каналі передачі), знизу - ВСШ, рівним 6 дБ (границя роботи критерію ідентифікації сузір'я), а зліва - граничної кривої для обраної величини кадру.

Також важливою особливістю даного алгоритму є його здатність компенсувати спотворення, що вносяться аналоговим радіочастотним трактом, що в даний час є актуальним завданням з огляду на зниження якості електронних компонентів на вітчизняному ринку.

З ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДИКИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ СПОТВОРЕННЯ СУЗІР'Я РАДІОСИГНАЛУ З МОДУЛЯЦІЄЮ QPSK

В даний час в області вимірювань телекомунікаційних величин велике поширення отримали вимірювальні лінії, засновані на принципі програмно-обумовленого радіо [8]. В даних вимірювальних комплексах використовуються прецизійні АЦП і потужні процесори, які здатні проводити великі обсяги обчислень в режимі реального часу. Подібні комплекси мають встановлену операційну систему і здатні перекривати майже весь спектр завдань [6, 9], що виникає перед інженером-розробником або робочим на серійному виробництві телекомунікаційної апаратури. Вони володіють необхідною продуктивністю для запуску в режимі реального часу потужних програмних пакетів обробки радіосигналів, наприклад, MATLAB, що відкриває для розробників і дослідників величезні можливості [4-8].

Найчастіше при тестуванні телекомунікаційного пристрою або лінії передачі інформації необхідно отримати не тільки бінарний результат щодо його відповідності заданим вимогам, а ідентифікувати причину невідповідності. Для даної задачі доводиться залучати фахівця, здатного адекватно налаштувати вимірювальний комплекс і зробити необхідні висновки. Процес пошуку та ідентифікації дефекту можна істотно спростити, використовуючи автоматизовану систему, яка дозволить видати зведення, що містить докладні характеристики системи.

3.1 Розрахунок завадостійкості радіосигналу з модуляцією QPSK

Розглянемо стійкість радіосигналу з фазової маніпуляцією QPSK. На нього в тракці передачі впливає адитивний білий гауссовський шум, а співвідношення E_b/N_0 є заданою в системі моделювання величиною. Отже, дисперсія шуму, що впливає на сигнал в каналі передачі, буде визначатися виразом

$$\sigma^2 = \frac{N_0}{2}$$

Математичне сподівання нулю, покладемо рівним що часто застосовується при моделюванні цифрових телекомунікаційних систем передачі інформації [1, 10]. Оскільки розглядається радіосигнал QPSK, то енергія символу E_s , еквівалентна енергії біта E_b , [6-7, 10]. Для оцінки завадостійкості необхідно встановити взаємозв'язок між дисперсією шуму σ^2 і енергією канального символу $kS(t + \tau)$. Враховуючи, що, завадостійке кодування не застосовується, отже, швидкість коду $R_c = 1$, а кількість біт на символ R_m , можна отримати коефіцієнт взаємозв'язку між E_s та σ^2 , який визначається наступним виразом:

$$\sigma^2 = E_s \left[2R_m R_c \frac{E_b}{N_0} \right]^{-1}$$

Помилка при ухваленні рішення виникає, коли $[I, Q]$ координати прийнятого символу \hat{S} відповідають іншому символу. Розглянемо комплексну огибающую квадратурного радіосигналу. Її загальний вигляд представлений виразом [9]:

$$S = I(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) - jQ(t) \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

де $I(t)$ та $Q(t)$ є інформаційними параметрами, які визначають положення канального символу сигнальному сузір'ї і відповідно комбінацію біт, яку він несе [16, 26].

При моделюванні цифрових телекомунікаційних систем в разі квадратурної демодуляції шум додається незалежно до кожної з квадратури [1, 6], а ймовірність символної помилки для QPSK буде описана наступним виразом:

$$SER_{QPSK} = F\left(\frac{\sqrt{E_s}}{2}\right) \left[1 - F\left(-\frac{\sqrt{E_s}}{2}\right) \right]$$

В даних виразах функція $F(x)$ є функцією розподілу нормального закону і визначається за допомогою функції помилок Лапласа [3], а визначають їх вираження матимуть вигляд:

$$F = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\hat{I}_s - \mu}{\sqrt{2\sigma^2}} \right) \right], \operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

Оскільки нормальний закон розподілу є симетричним, справедливим буде наступна тотожність

$$F(-\sqrt{E_s}) = 1 - F(\sqrt{E_s})$$

відповідно ймовірність обох типів помилок однакова. Після отримання всіх вихідних даних, необхідних для розрахунку, може бути визначена стійкість радіосигналу з модуляцією QPSK при впливі АБГШ [9, 17]:

$$SER_{QPSK} = \left[\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \right]^2$$

Отримано оцінку SER при когерентном детектированнии радіосигналу QPSK. Оскільки один символ в QPSK несе два біти інформації, а ймовірності їх появи однакові, то ймовірність бітової помилки може бути представлена наступним виразом [6, 8]:

$$BER_{QPSK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right)$$

Розглянемо далі завадостійкість зазначених радіосигналів в разі спотворення сигнального сузір'я. Тут можливі два основних типи спотворення сузір'я, оскільки інформація вже представлена у вигляді суперпозиції двох

квадратурних складових. Фізично дані спотворення можна описати шляхом введення в систему розбаланса квадратур.

На рисунках 3.1 і 3.2 наведені можливі варіанти спотворення сигнального сузір'я QPSK і показані механізми їх опису: на рисунку 3.1 - фазовий неузгодженість, на рисунку 3.2 - амплітудний.

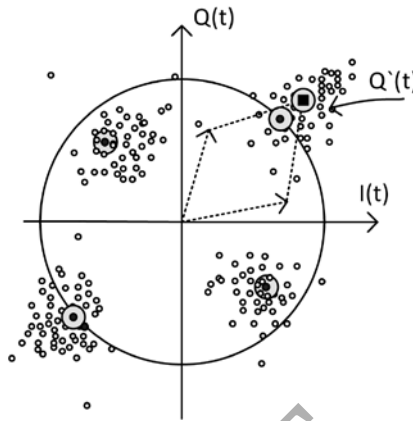


Рисунок 3.1 - Види спотворення QPSK - фазовий розбаланс

Обчислимо ймовірність символної помилки в кожному з цих випадків. При кожному з видів розбаланса квадратур сигнальне сузір'я буде спотворено таким чином, що ймовірність прийому символів буде різною.

Причому в залежності від ступеня впливу спотворення на який приймається в телекомунікаційній системі сигнал прояв даних характерних відмінних ознак буде різним.

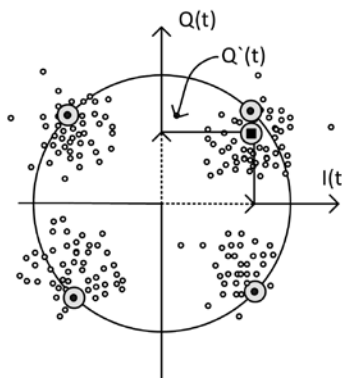


Рисунок 3.2 - Види спотворення QPSK - амплітудний розбаланс

Розглянемо більш докладно фазовий неузгодженість. Імовірність правильного прийому і символної помилки буде різна для символів, що передають комбінації біт 00,11 і 10,01 (у разі коду Грея). Імовірність правильного прийому символу, передає 00,

$$SER_{PHIMB}(R00) = \frac{1}{4} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{E_b}{N_0} (1 + \sin(\Theta)) \right) \right]^2$$

$$\forall \Theta \notin \frac{\pi}{2} \cdot n, n = 2 \cdot k + 1 \in \mathbb{Z}$$

Повна ймовірність символної помилки дорівнює:

$$SER_{PHIMB}(ErrTol) = 1 - SER_{PHIMB}(R00)$$

Імовірність прийому символу 10 при передачі 00 дорівнює ймовірності прийому символу 01:

$$SER_{PHIMB}(00,10) = \frac{1}{4} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} (1 + \sin(\Theta)) \right) \right] \cdot \left[\operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} (1 + \sin(\Theta)) \right) \right]$$

$$\forall \Theta \notin \frac{\pi}{2} \cdot n, n = 2 \cdot k + 1 \in \mathbb{Z}$$

Імовірність прийому символу 11 при передачі символу 00 дорівнює

$$SER_{PHIMB}(00,11) = \frac{1}{4} \left[\operatorname{erf} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} (1 + \sin(\Theta)) \right) \right]^2$$

$$\forall \Theta \notin \frac{\pi}{2} \cdot n, n = 2 \cdot k + 1 \in \mathbb{Z}$$

Для символу, передає 01, відповідно отримуємо:

$$SER_{PHIMB}(R01) = \frac{1}{4} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} (1 - \sin(\Theta)) \right) \right]^2$$

$$\forall \Theta \notin \frac{\pi}{2} \cdot n, n = 2 \cdot k + 1 \in Z$$

$$SER_{PHIMB}(01,11) = \frac{1}{4} \left[\operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{E_b}{N_0}} (1 - \sin(\Theta)) \right) \right] \cdot \left[1 + \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{E_b}{N_0}} (1 - \sin(\Theta)) \right) \right]$$

$$\forall \Theta \notin \frac{\pi}{2} \cdot n, n = 2 \cdot k + 1 \in Z$$

$$SER_{PHIMB}(01,10) = \frac{1}{4} \left[\operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{E_b}{N_0}} (1 - \sin(\Theta)) \right) \right]^2$$

$$\forall \Theta \notin \frac{\pi}{2} \cdot n, n = 2 \cdot k + 1 \in Z$$

де Q - кут розбаланса квадратур. Відзначимо, що дані формули будуть невірні для нульового кута розбаланса. Для обчислення ймовірностей помилок в даному випадку необхідно не враховувати додатковий множник або скористатися формулами для символу, передає значення 00.

У разі спотворення сузір'я, описуваного амплітудним розбалансом, ймовірність символної помилки буде ідентична для всіх символів і описуватися виразами:

$$SER_{AIMB}(00,01) = \frac{1}{4} \left[\operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \right] \cdot \left[1 + \operatorname{erfc} \left(k \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \right]$$

$$SER_{AIMB}(00,10) = \frac{1}{4} \left[1 + \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \right] \cdot \left[\operatorname{erfc} \left(k \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \right]$$

$$SER_{AIMB}(00,11) = \frac{1}{4} \left[\operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \right] \cdot \left[\operatorname{erfc} \left(k \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \right]$$

$$SER_{AIMB}(R) = \frac{1}{4} \left[1 + \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \right] \cdot \left[1 + \operatorname{erfc} \left(k \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \right]$$

де k - коефіцієнт, що характеризує ступінь амплітудного розбаланса квадратур.

3.2 Механізм ідентифікації спотворення радіосигналу з QPSK

Розглянемо докладніше залежності ймовірностей появи символних помилок різних типів для амплітудного та фазового розбалансів від відношення сигнал-шум. У разі різних типів спотворення сигнального сузір'я буде видно відмінності у функції розподілу символної помилки під час передачі різних символів та залежність їх зміни від ступеня спотвореності сузір'я. Також для фазового розбалансу характер розподілу залежатиме від символу, що передається, у той час як для амплітудного – він може бути ідентичним.

На рисунках 3.3 і 3.4 представлені залежності густин ймовірності символної помилки для фазового розбалансу квадратур для різних величин кута зсуву при передачі символу S(00).

На аналогічній інфографіці (рисунки 3.5 і 3.6) для символу S (01), що передається, серйозні відмінності в характері функції розподілу символної помилки будуть чітко видно.

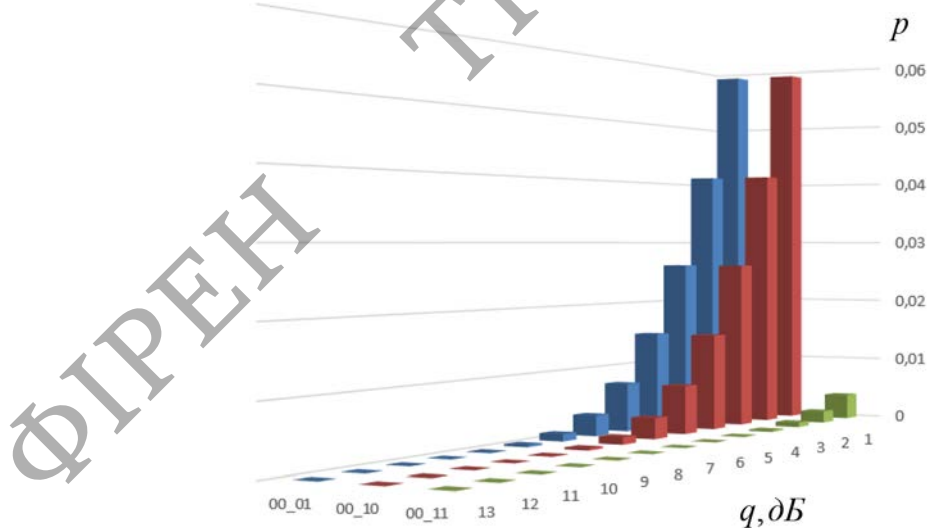


Рисунок 3.3 - Зміна залежності розподілу ймовірностей символної помилки під час передачі символу 00 від кута розбалансу

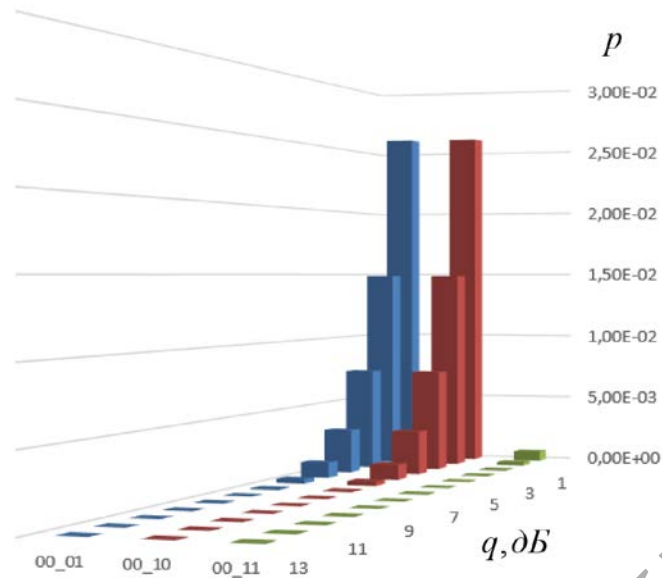


Рисунок 3.4 - Зміна залежності розподілу ймовірностей символної помилки під час передачі символу 00 від кута розбалансу

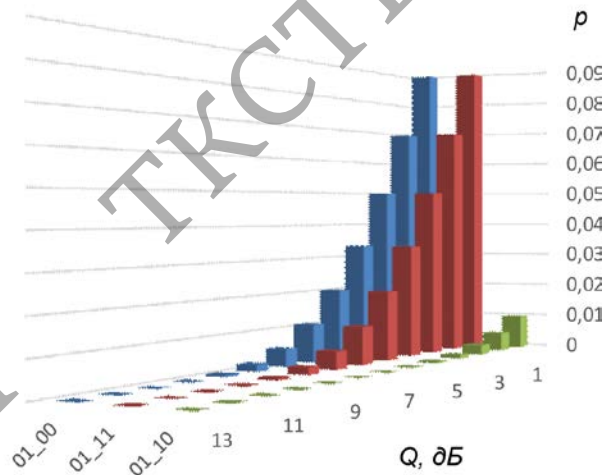


Рисунок 3.5 - Зміна залежності розподілу ймовірностей символної помилки під час передачі символу 01 при дії малого розбалансу

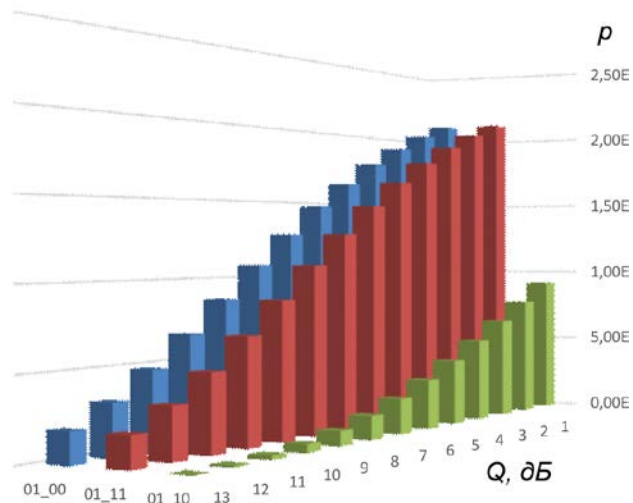


Рисунок 3.6 - Зміна залежності розподілу ймовірностей символної помилки під час передачі символу 01 при дії сильного розбалансу

Отже, у разі фазового розбалансу, зі збільшенням усунення осей, незалежно від цього, розподіл якого із символів розглядається, спостерігатиметься домінуюча помилка. Дане твердження є справедливим і для випадку амплітудного розбалансу квадратур, інфографіка, що ілюструє це, наведена на рисунках 3.7 та 3.8.

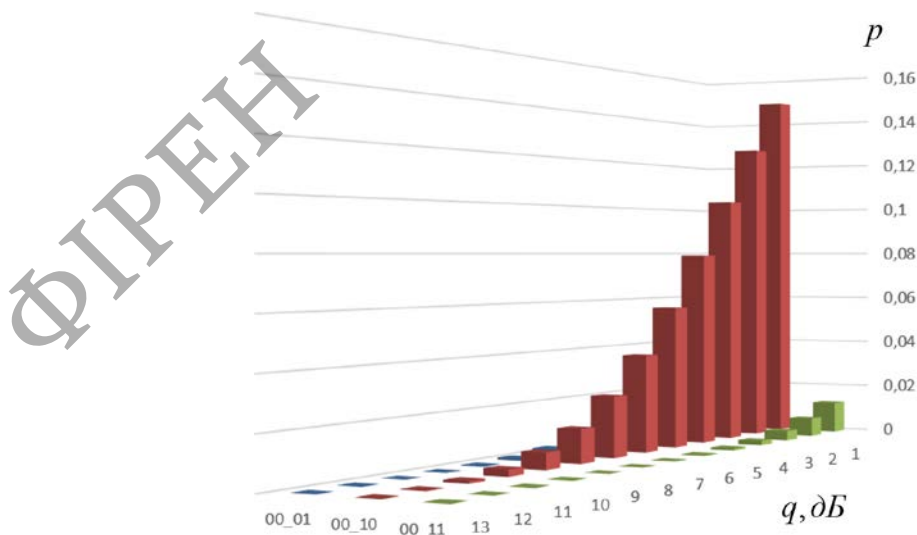


Рисунок 3.7 - Зміна залежності розподілу ймовірностей символної помилки від ступеня амплітудного розбалансу

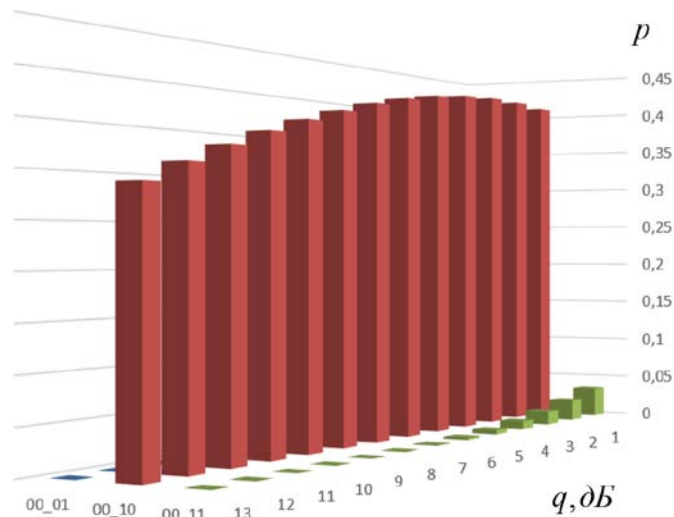


Рисунок 3.8 - Зміна залежності розподілу ймовірностей символної помилки від ступеня амплітудного розбалансу

Варто відзначити принципову відмінність в поведінці домінуючою помилки при різних типах розбаланса. У разі амплітудного вона буде симетрична, а саме, якщо при розгляді функції розподілу символу, передає $\bar{S}(00)$, буде переважати помилка $\bar{S}(00-01)$, то відповідно при розгляді функції розподілу символу $\bar{S}(01)$ найбільш імовірною буде помилка $\bar{S}(01-00)$.

Іншими словами, у разі наявності істотного щодо впливу АБГШ на сигнал спотворення сигнального сузір'я, що приймається, переважаючими будуть помилки між символами, розташованими дзеркально щодо однієї з квадратних осей. Змін щодо іншої осі при дії даного спотворення не спостерігається. Ілюстрація поведінки помилки при амплітудному розбалансі представлена рисунку 3.9.

У разі спотворення сигнального сузір'я впливу у вигляді фазового розбалансу буде спостерігатися інша картина. Поведінка домінуючої помилки для випадку позитивного розбалансу, зображено рисунку 3.10.

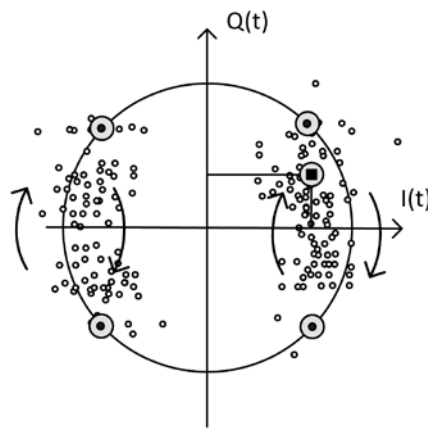


Рисунок 3.9 - Діаграма поведінки домінуючої помилки у разі впливу амплітудного розбалансу

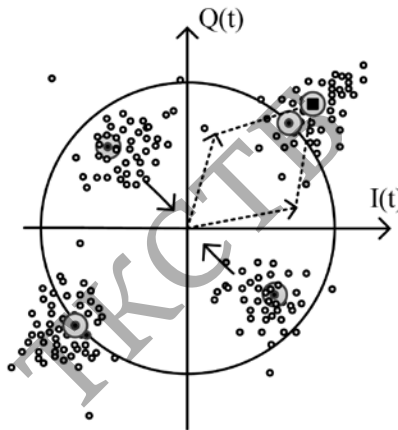


Рисунок 3.10 - Діаграма поведінки домінуючої помилки для фазового розбалансу

Таким чином, переважна помилка для кожного символу буде зміщена в сусідній квадрант у напрямку за годинниковою стрілкою. Саме на використанні цих особливостей поведінки переважна помилка і пропонується розрізняти між собою тип спотворює впливу.

Використовуючи виявлені важливі розбіжності у поведінці помилки при вплив різних типів спотворень, з'являється можливість розробити та реалізувати методику їх ідентифікації. Вона має забезпечувати як розрізнення впливу лінійних спотворень сузір'я, а й ідентифікувати вплив на сигнал АБГШ.

3.3 Опис методики ідентифікації спотворення

Розглянемо поетапно запропоновану методику. Нижче наведено її блок-схему (рисунок 3.11).

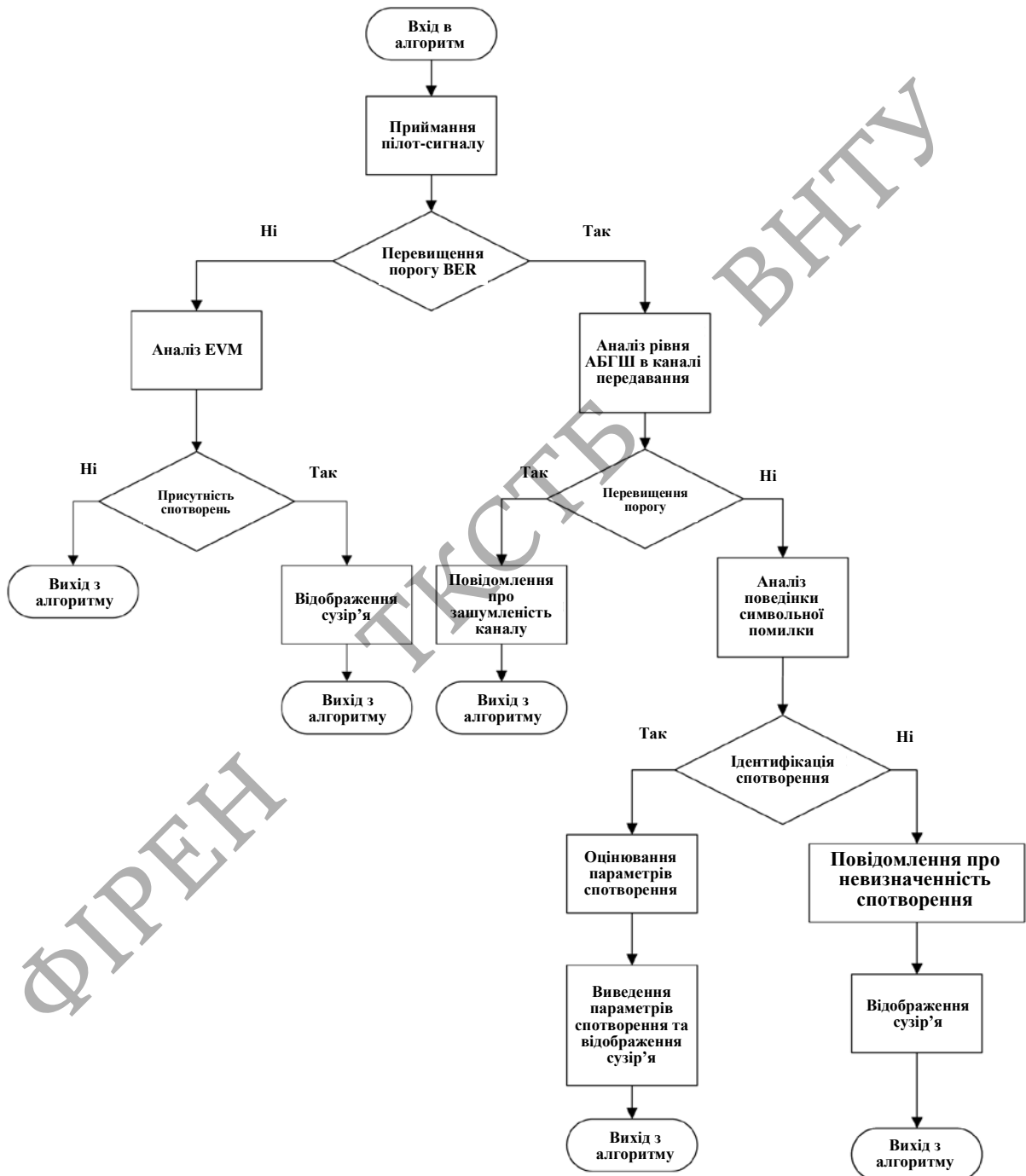


Рисунок 3.11 - Блок-схема роботи методики ідентифікації спотворення

У першому етапі відбувається перевірка відповідності ймовірності бітової помилки заданим до системи вимогам. У разі її відповідності система вважається працездатною та здійснюється вихід з алгоритму. Коли поріг BER перевищений, необхідно визначити, що є причиною погіршення якості передачі. Розрізнення впливу АБГШ та спотворення сузір'я здійснюється шляхом статистичного аналізу вихідних даних після демодулятора, тобто після прийняття м'якого рішення.

На рисунку 3.12 наведено два сигнальні сузір'я. Незважаючи на серйозну відмінність щодо енергії біта до спектральної густини потужності шуму, ймовірність появи бітової помилки тут однакова.

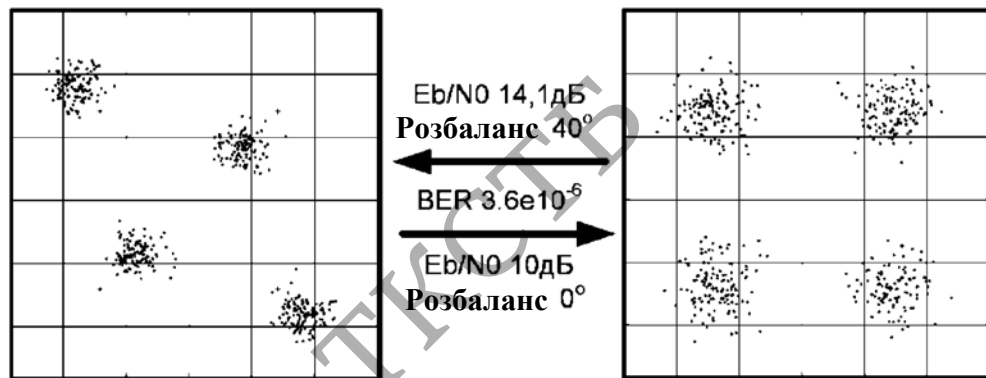


Рисунок 3.12 - Приклад сузір'їв з однаковим BER

Щоб розв'язати завдання розрізнення впливу АБГШ і повороту сигнального сузір'я, розглянемо поведінку величини вектора помилки EVM, коли її обчислення і збереження показників у буфері. За допомогою правила Стерджеса [14, 19] дані в буфері дані розбиваються на інтервали, величина яких визначається наступним виразом:

$$l = \frac{\overline{EVM}_{\max} - \overline{EVM}_{\min}}{1 + \log_2(k)}$$

де \overline{EVM}_{\max} та \overline{EVM}_{\min} максимальна і мінімальна величина усередненого вектора помилки, обчисленого при обробці кадру, довжина якого дорівнює 1024 біта, k - розмір кадру. На наступному етапі відбувається підрахунок кількості влучень значень в буфері в кожен з інтервалів L_i , абсолютні значення кордонів якого визначаються наступним виразом (рисунок 3.13):

$$L_i = \left\{ \overline{EVM}_{\min} + li; \overline{EVM}_{\min} + l(i+1) \right\}$$

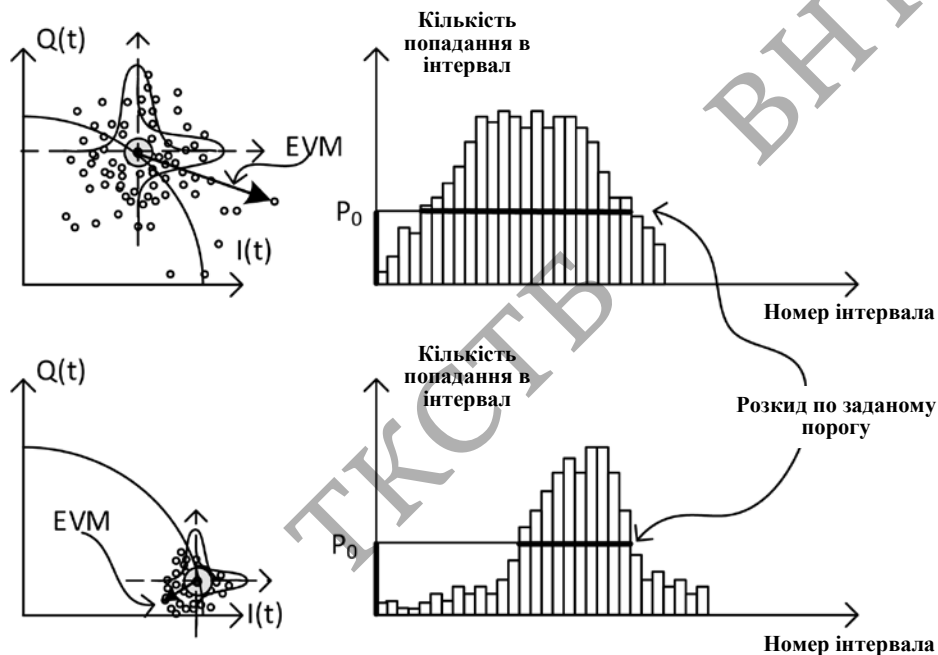


Рисунок 3.13 - Графічна ілюстрація процесу розбиття на інтервали результатів моделювання для заданого спотворення та ВСШ

На представленій графічній інтерпретації даного процесу зліва зображено сигнальне сузір'я, при прийомі якого проведена агрегація показників, а праворуч гістограма значень \overline{EVM} по інтервалах L_i . Дані інтервали виражені у відсотках, де по осі абсцис за 100% прийнята величина, рівна $\sqrt{E_s}$, а по осі ординат кількість відліків, що потрапили в інтервал.

Даний механізм забезпечує ідентифікацію впливу АБГШ на сигнал у каналі передачі навіть за умови збереження рівня сигналу на вході приймача.

У тому випадку, якщо на радіосигнал впливає спотворення при незначному АБГШ, медіана розподілу, представленого на гістограмі, буде зміщена пропорційно до впливу спотворення, в той час як розкид щодо неї буде незначним. Інакше спостерігатиметься зворотна картина.

У разі виявлення високого рівня шуму в радіоканалі передачі інформації на дисплей повинно бути виведене повідомлення та здійснено вихід із програми, інакше вступає в роботу блок ідентифікації спотворення. Головні особливості поведінки символної помилки, виходячи з яких побудований алгоритм ідентифікації спотворення, описані раніше. Далі необхідно сформулювати критерії, за якими визначатиметься тип спотворення, та обчислити ймовірність ідентифікації.

Амплітудним розбалансом буде визнано спотворення, при впливі якого в переданому еталонному повідомленні, що містить комбінацію біт, що визначає рівну кількість всіх символів сигнального сузір'я.

У разі фазового розбалансу достатньою умовою буде наявність у переданому еталонному повідомленні, що містить комбінацію біт, що визначає рівну кількість всіх символів сигнального сузір'я, переважання помилок при передачі символів однієї з діагоналей сигнального сузір'я. Пороговим значенням вважатиметься дворазове переважання.

Помилка вважатиметься переважаною у разі, якщо вона становитиме понад 0,5 від загальної кількості помилок. Наведемо аналітичний вираз критерію:

$$Pm(k) = \sum_{k=0}^{\frac{m}{2}} \frac{m!}{k!(m-k)!} p_{prev}^k (1-p_{prev})^{m-k}$$

де p_{prev} ймовірність домінуючої помилки, m - кількість що відбулися помилок. Робота даної методики побудована на аналізі помилок, відповідно необхідно їх наявність при передачі повідомлення.

Якщо переважна помилка не виявлена, буде проведено аналіз різниці помилок між діагональними символами. Наявністю розбалансу вважатиметься переважання однієї з помилок над іншою більш ніж удвічі.

Дана особливість вносить обмеження на сферу застосування методики, відповідно необхідно оцінити ймовірність бітової помилки при різних відношеннях енергії біта до спектральної щільності потужності шуму та величинах розбалансу. Для отримання даних про BER проведено комп'ютерне моделювання з використанням програмного пакету Matlab & Simulink, в якому розроблена система, що складається з моделі Simulink і керуючого скрипта. Основні функції та схема взаємодії кожного з компонентів системи моделювання наведено на рисунку 3.14.

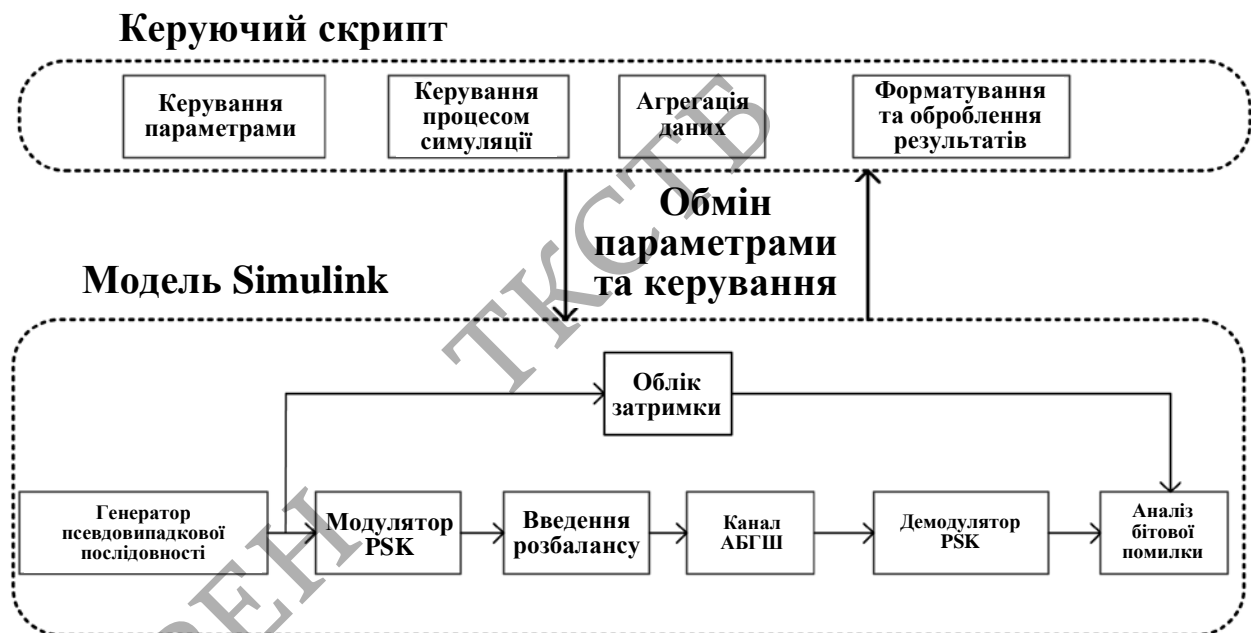


Рисунок 3.14 - Структурна схема системи моделювання процесу агрегації та аналізу даних

Розбиття системи моделювання на дві компоненти дозволяє повністю автоматизувати процес агрегації та аналізу даних [4, 7] за рахунок керування параметрами моделювання за заданою користувачем програмою в автономному режимі. Дане рішення дозволяє проводити аналіз великих статистичних вибірок для різних умов, наприклад, відношення сигнал-шум, що змінюється, в каналі

передачі, без необхідності контролю роботи моделі, що дозволяє отримати результат в стислі терміни.

3.5 Моделювання роботи методики ідентифікації спотворення радіосигналу

Розглянемо докладніше роботу системи моделювання, блок-схема роботи якої наведено на рисунку 3.15.

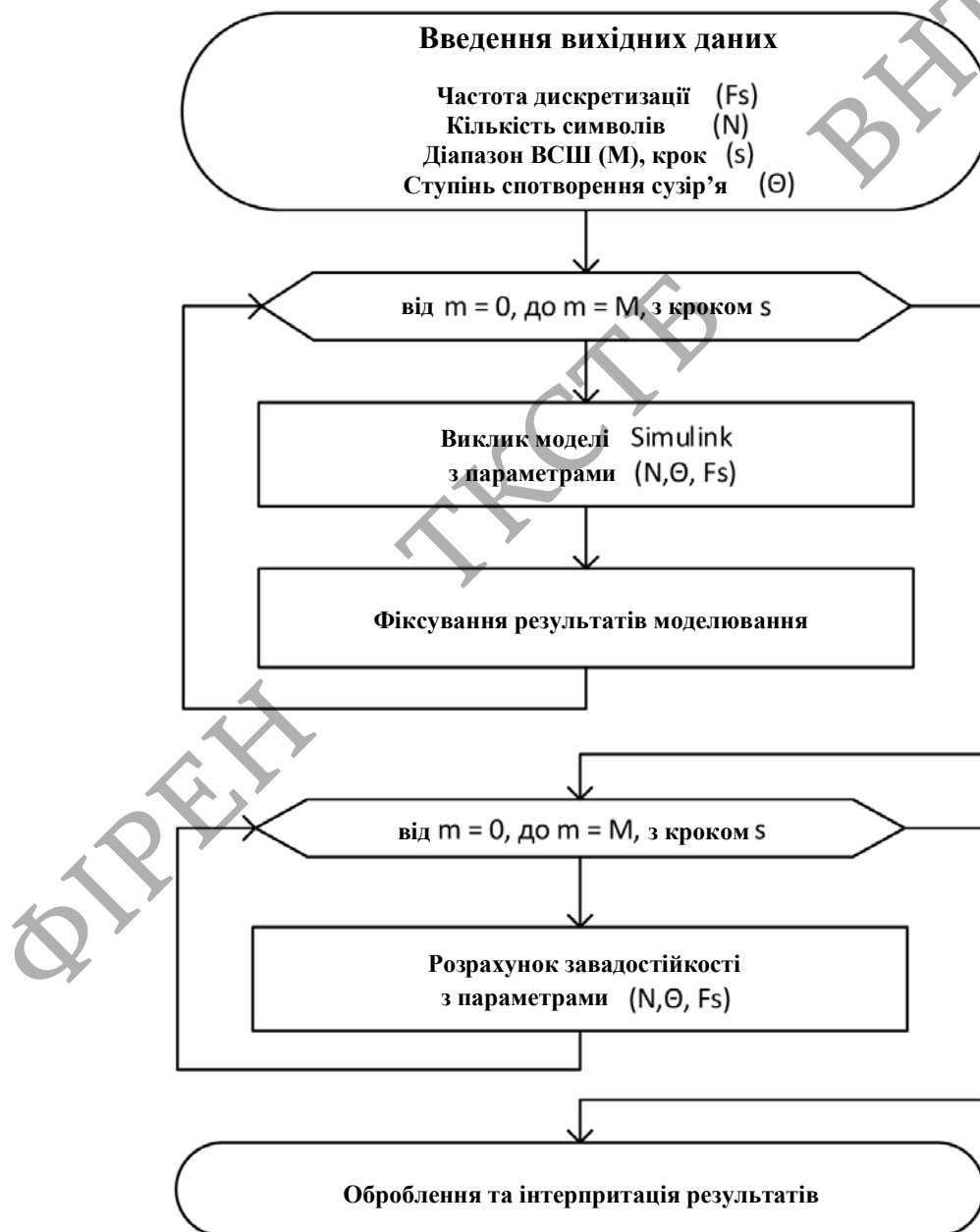


Рисунок 3.15 - Блок-схема функціонування системи моделювання ідентифікації спотворення радіосигналу

При старті відбувається ініціалізація початкових параметрів моделі Simulink - задається частота дискретизації в системі, кількість символів, що передаються за один цикл роботи моделі, ступінь спотворення сузір'я, діапазон ВСШ, на якому проводитиметься розрахунок.

На наступному етапі здійснюється циклічний виклик Simulink моделі МС та накопичення статистики для різних ВСШ у радіоканалі передачі цифрової інформації та агрегація результатів моделювання. Далі відбувається одержання розрахункових значень. На завершальному етапі відбувається обробка та інтерпретація отриманих даних.

На рисунках 3.16 та 3.17 представлені тривимірні діаграми, що відображають ймовірність появи заданої кількості помилок при передачі тестового повідомлення довжиною 108 біт залежно від ВСШ та ступеня спотворення сузір'я.

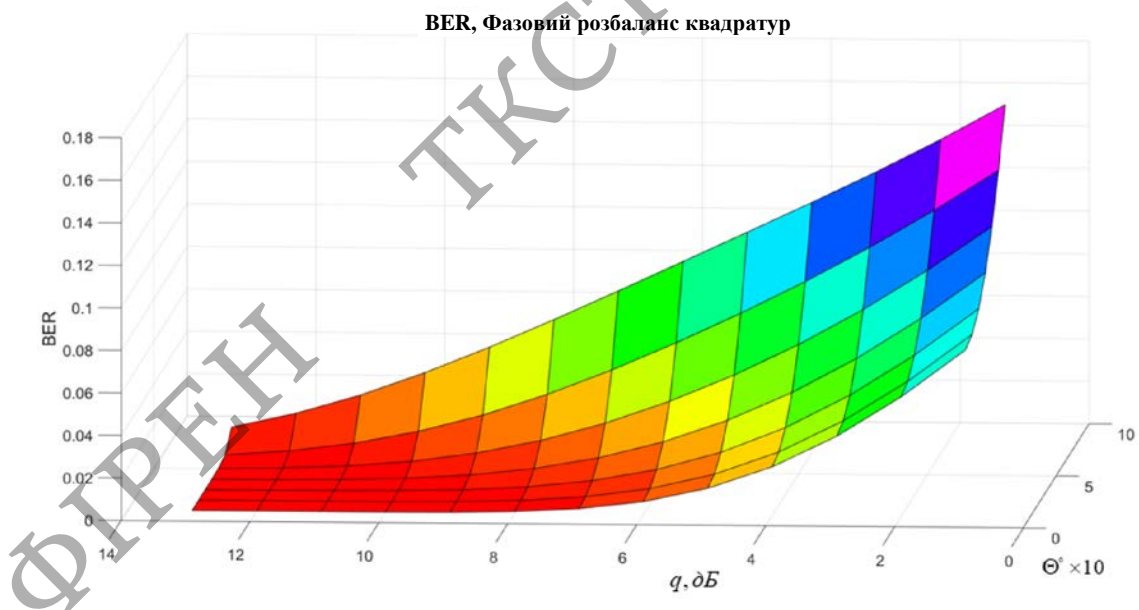


Рисунок 3.16 - Залежність бітової помилки від ВСШ при різних кутах розбалансу квадратур

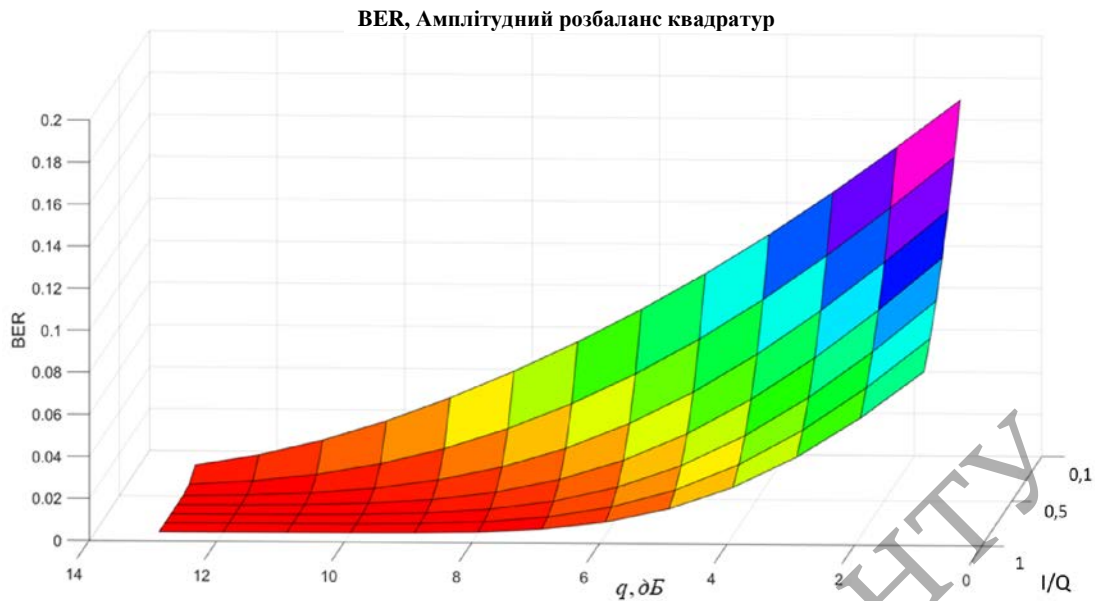


Рисунок 3.17 - Залежність бітової помилки від ВСШ за різних величин розбалансу квадратур

У разі необхідності розрахунку ймовірності перевищення заданої кількості помилок, оскільки кількість випробувань досить велика, можна застосувати наближену формулювання теореми Муавра-Лапласа, оскільки умови експерименту повністю задовольняють області її застосування, з метою оцінки ймовірності зазначеної події. Нижче наведено наближене формулювання інтегральної теореми Муавра-Лапласа:

$$P_n(m) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi pq}} e^{-\frac{x^2}{2}}, x = \frac{m - np}{\sqrt{npq}}$$

де n - кількість переданих символів, p - ймовірність помилки, q - ймовірність правильного прийому, m - кількість помилково прийнятих символів [2, 5]. Відповідно вираз, що описує вірогідність того, що станеться більше, ніж m помилок, буде виглядати наступним чином:

$$P_n(\geq m) = 1 - \sum_{i=1}^{m-1} \frac{1}{\sqrt{2\pi n p q}} e^{-\frac{x_m^2}{2}}$$

3.6 Огляд результатів роботи методики

Виходячи з поданої на рисунках 3.15 і 3.16 інформації, можуть бути визначені області виявлення спотворення та області, в яких методика здатна їх ідентифікувати - тобто розрізнити між собою вплив таких лінійних спотворень сигнального сузір'я як вплив для амплітудного розбалансу квадратур і фазового розбалансу. Области, у яких можливе стійке розрізнення кожного з спотворень, представлені рисунку 3.18 для фазового розбалансу квадратур і рисунку 3.19 для амплітудного розбалансу квадратур.

На рисунку 3.18 наведена діаграма роботи методики в наступних умовах: кут фазового розбалансу змінюється в межах від 0 до $\frac{5\pi}{18}$ співвідношенні $\frac{E_b}{N_0}$ змінюється від 0 до 12 дБ, довжина кадру, на якому обчислюють вектор помилки, дорівнює 1024 біта, кількість переданих символів дорівнює $4 \cdot 10^7$.

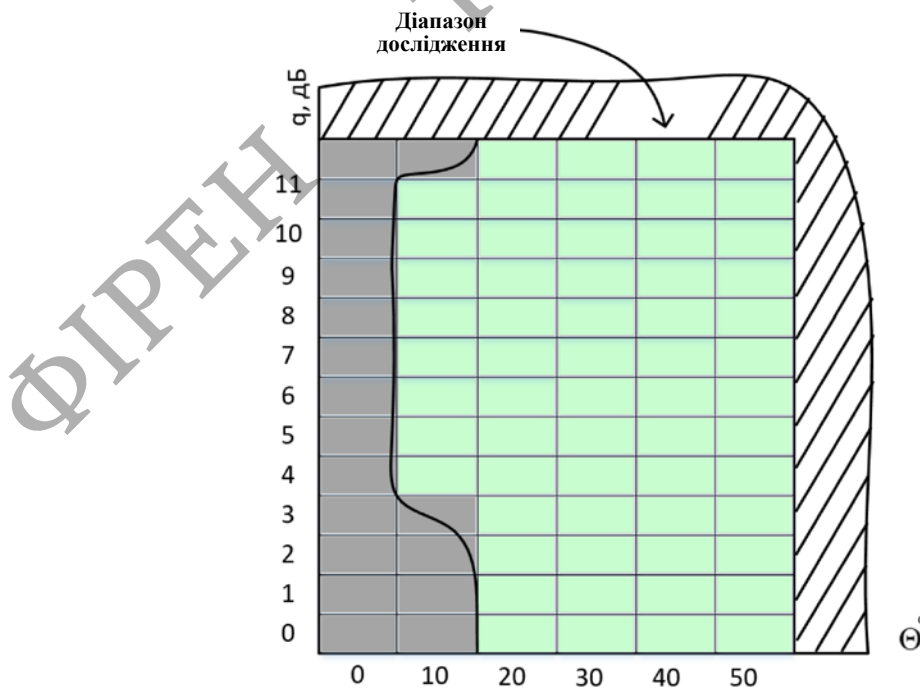


Рисунок 3.18 - Діаграма роботи методики за умов фазового розбалансу

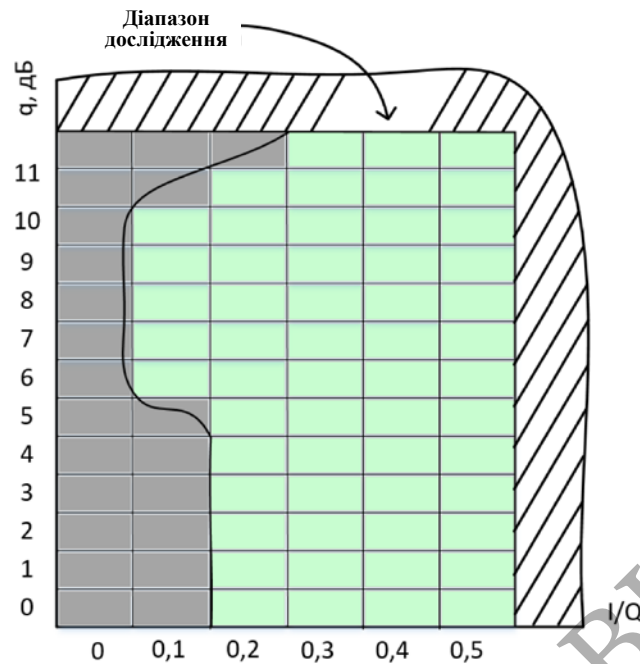


Рисунок 3.19 - Діаграма роботи методики в умовах амплітудного розбалансу

На рис 3.19 наведено роботу методики в наступних умовах: кут амплітудного розбалансу змінюється в межах від 0 до 0,5 (-6 дБ), співвідношення $\frac{E_b}{N_0}$ змінюється від 0 до 12 дБ, довжина кадру, на якому обчислюється вектор помилки, дорівнює 1024 біта, кількість переданих символів дорівнює $4 \cdot 10^7$.

3.7 Висновки до розділу 3

Розроблено методику, що дозволяє проводити ідентифікацію спотворення, що впливає на сигнальне сузір'я радіосигналу, що приймається. Вона заснована на використанні комплексної оцінки якості радіоканалу телекомунікаційної системи передачі інформації, а саме, виявленні та розрізненні причин спотворювального впливу. Ця комплексна оцінка будується на аналізі статистичних показників сигналу і основі нееталонної обчисленої величини вектора модуляційної помилки.

Методика дозволяє визначати наявність впливу на приймається радіосигнал лінійних спотворень, таких як фазовий і амплітудний розбаланси

квадратур, і ідентифікувати тип спотворення, що впливає на сигнал, в широкому діапазоні ВСШ із заданою ймовірністю. З погляду практичного застосування дана методика дозволяє підвищити ступінь автоматизації процесу тестування та регулювання телекомунікаційного обладнання під час його розробки та виробництва.

Встановлено, що ідентифікація фазового розбалансу можлива за його величини понад 10° і ВСШ понад 6 дБ. У разі амплітудного розбалансу спостерігаються схожі результати, крім високих ставлення ВСШ (близько 11-12 дБ) при мінімальних величинах розбалансу. Дане явище пояснюється високою стійкістю до перешкод радіосигналу з модуляцією QPSK.

Однією з головних переваг запропонованої методики є те, що у разі наявності сучасної виробничої бази, зокрема вимірювального обладнання, яке підтримує сполучення з ПК за допомогою стека протоколів VISA або іншого поширеного стека протоколів, впровадження у виробництво може бути здійснено в найкоротші терміни без значних додаткових витрат за рахунок поєднання.

Запропонована методика може бути реалізована у сучасних вимірювальних системах, призначених для тестування та оцінки ефективності роботи телекомунікаційного вимірювального обладнання. Простота впровадження забезпечується за рахунок того, що багато сучасних вимірювальних систем у галузі телекомунікацій побудовані за технологією програмно-визначуваного радіо, а їх конкретний функціонал майже повністю визначається програмним забезпеченням, яке встановлено на вимірювальну систему.

4 ІДЕНТИФІКАЦІЯ СПОТВОРЕННЯ СУЗІР'Я РАДІОСИГНАЛУ З МОДУЛЯЦІЄЮ QAM-16

4.1 Особливості оцінювання якості радіосигналу

Існує безліч методик оцінки якості радіосигналу, що передається, і завадостійкості телекомунікаційних систем в цілому, але підсумковим критерієм якості роботи цифрової системи передачі виступають коефіцієнти бітової або символної помилки. Отже, для оцінки якості роботи приймального пристрою найбільш ефективною є методика, заснована на передачі еталонних послідовностей та підрахунку кількості помилок, за умови подачі на вхід приймача радіосигналу заданого рівня.

У разі оцінки якості радіосигналу на виході передавача застосування методики, заснованої на підрахунку помилок, нераціонально, оскільки навіть у разі спотворення сигнального сузір'я відношення енергії біта до спектральної густини потужності шуму залишається високим. Для оцінки якості квадратурних радіосигналів із цифровою маніпуляцією найбільш поширеними та ефективними є пов'язані методики вимірювання величини вектора помилок та коефіцієнта модуляційних помилок [3].

Схематичне зображення методики проведення вимірювань представлено рисунку 4.1.

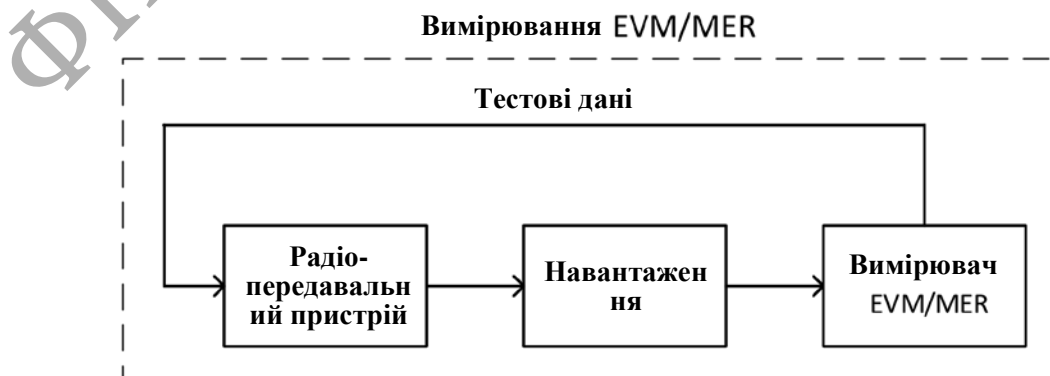


Рисунок 4.1 - Схема вимірювання EVM та MER

У чистому вигляді дані методики дають уявлення лише про ступінь спотвореності радіосигналу і, відповідно, про стійкість до перешкод системи передачі, але вони не дають інформації про причину спотворення радіосигналу, тобто не ідентифікують його. У цій роботі пропонується модифікована методика оцінки якості радіосигналу з модуляцією QAM-16, що дозволяє не тільки оцінити стійкість до перешкод системи передачі інформації, але і визначити тип спотворення. Інформація про тип спотворення радіосигналу може істотно скоротити час регулювання телекомунікаційного пристрою під час його виробництва. Запропонована методика може бути покладена в основу системи автоматичного вимірювання та налаштування параметрів пристрою за умови підтримки апаратною платформою програмного пакету MATLAB. Ще одним напрямком застосування може бути автоматизований моніторинг радіоліній.

4.2 Нелінійне спотворення сузір'я та методика відтворення підсилювальної характеристики

У першу чергу розглянемо нелінійне спотворення радіосигналу підсилювачем, зображене на рисунку 4.2, оскільки радіосигнали QAM мають високий пік-фактор і великий розкид символів з енергетики, внаслідок чого лінійність підсилювальної характеристики є одним з найважливіших параметрів при проектуванні передавальної частини пристрою [4, 7, 15].

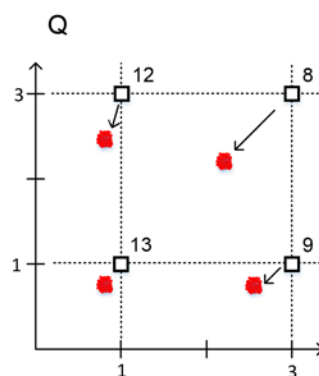


Рисунок 4.2 - Спотворення сигнального сузір'я при проходженні нелінійного підсилювача

При комп'ютерному моделюванні цієї ситуації найбільш адекватним рішенням є імітація моделі підсилювальної характеристики реального підсилювача. Як приклад поставимо формальне завдання: необхідно у середовищі MATLAB Simulink створити модель досить поширеного підсилювального модуля Polyfet RF Devices MLCQ-02 [4], використовуючи апроксимацію кубічним поліномом. На рисунку 4.3 наведено його підсилювальну характеристику для робочої частоти 512 кГц.

У вказаному середовищі моделювання є блок-підсилювач, нашим завданням є налаштувати його так, щоб він максимально відповідав поведінці реального підсилювача за умови використання апроксимації кубічним поліномом.

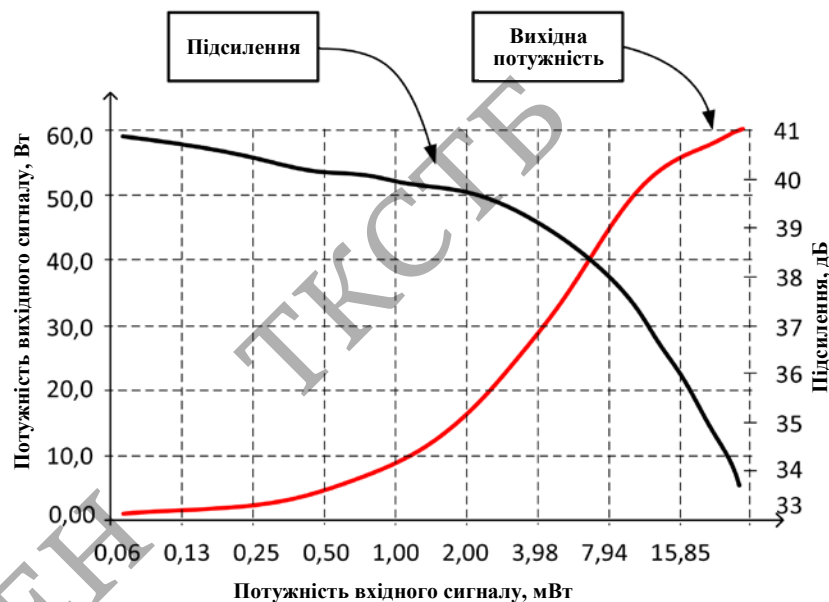


Рисунок 4.3 - Підсилювальна характеристика та вихідна потужність модуля MLCQ-02 в залежності від потужності вхідного сигналу

На першому етапі необхідно сформулювати масив опорних точок, використовуючи технічну документацію підсилювального модуля. У цих точках необхідно зафіксувати такі значення: вхідна потужність [Вт], вихідна потужність [Вт], посилення [дБ]. Ці три масиви будуть вихідними даними для побудови моделі підсилювача. З другого краю етапу необхідно розглянути, як відбувається

апроксимація підсилювальної характеристики з допомогою кубічного полінома серед моделювання. Варто зазначити, що апроксимація кубічним поліномом не враховує спотворення фази радіосигналу в підсилювальному тракту, але в документації на підсилювальний модуль інформації щодо спотворення фази не наведено, тому відсутність такої інформації не є суттєвим упущенням при створенні моделі тракту.

Спочатку обчислюється нормувальний коефіцієнт f , який використовується для нормування вхідного радіосигналу. Основою розрахунку нормувального чинника служить точка усічення вхідного радіосигналу третього порядку ІПЗ (англ. third-order input intercept point) [4, 7], яка задає масштаб нормування наступним образом:

$$f = \sqrt{\frac{3}{IIP3[W]}} = \sqrt{\frac{3}{10^{(IIP3[dBm]-30)/10}}}$$

Нормуємо і усікається масив вихідних даних. Всі значення більше одиниці усікаються:

$$P_{SCALED} = P_{IN} * f; (P_{IN} * f > 1) = 1$$

На наступному етапі необхідно застосувати нелінійне амплітудне перетворення від масиву, в якому зберігаються значення вхідної потужності по наступному закону:

$$F_{AM/AM} = U - \frac{U^3}{3}$$

Після застосування перетворення необхідно привести значення елементів масиву вхідної потужності до вихідних, шляхом розподілу на нормувальний

коефіцієнт f , і помножити на коефіцієнт посилення G , який є одним із вихідних параметрів:

$$P_{MDL} = \left(\frac{P_{SCALED} - P_{SCALED}^3}{f} \right) 10^{\frac{G}{10}}$$

Отримавши вираз, що описує підсилювальну характеристику моделі підсилувача, необхідно провести оцінку точності, з якою воно описує реальну підсилювальну характеристику, та підібрати оптимальні коефіцієнти.

Для оцінки пропонується використати метод найменших квадратів. Загостримо увагу на тому моменті, що всі параметри апроксимації визначаються обраним значенням ПРЗ, отже необхідно провести цикл обчислень, поступово зрушуючи даний параметр на невеликий крок. Коли значення ПРЗ багаторазово перевищить максимальне значення масиву значень вхідної потужності, сума найменших квадратів буде монотонно зростати, і експеримент можна зупинити.

На рисунку 4.4 наведено блок-схему алгоритму, за допомогою якого здійснювалися розрахунки та підбір коефіцієнтів. На вхід подаються вихідні дані, отримані документації на підсилювальний модуль. Після їх форматування проводиться розрахунок точки усічення для стартового набору апроксимаційних значень.

Після цього проводиться підбір коефіцієнтів моделі на заданому інтервалі із заданим кроком та перевірка точності оцінки за допомогою обчислення помилки за методом найменших квадратів у контрольних точках.

В результаті зроблених обчислень отримані всі необхідні дані для створення моделі підсилувача, яка відповідає реальному підсилювальному модулю. Після завершення цього етапу можна розпочинати створення Simulink-моделі.



Рисунок 4.4 - Блок-схема алгоритму розрахунку апроксимованої підсилювальної характеристики

На рисунку 4.5 наведено графіки підсилювальної характеристики документації на пристрій MLCQ-02 і характеристика, яка буде реалізована в моделі в результаті введення розрахованих параметрів.

Варто зазначити, що на даному графіку шкала потужності наведена в лінійному масштабі, тому, на перший погляд, вони різняться з рисунком 4.3.

Наведемо приклад спотворення радіосигналу QAM-16 за допомогою отриманої моделі, використовуючи наступні вихідні дані: середня потужність радіосигналів, що подаються на підсилювач 5 мВт і 15 мВт, в якості оцінки буде використовуватися величина вектора помилок, обчисленого на кадрі розміром 10^7 символів. Для першого випадку величина вектора помилки становить 5.053%, для другого – 26.6% відповідно.

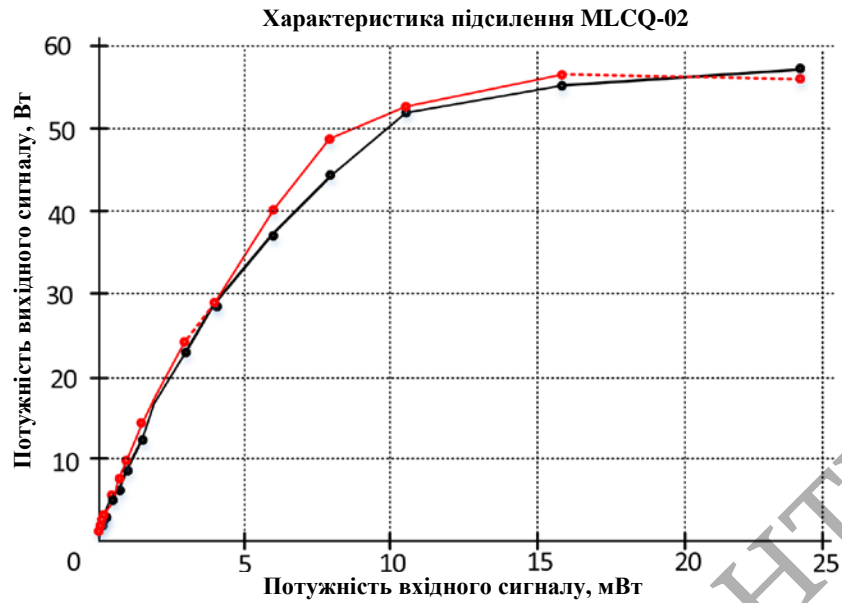


Рисунок 4.5 - Підсилувальна характеристика MLCQ-02 (суцільна лінія), підсилувальна характеристика моделі пристрою (пунктирна лінія)

На рисунках 4.6 та 4.7 наведено діаграми сигнальних сузір'їв QAM-16 для різних рівнів вхідної потужності радіосигналу, поданого на модель підсилувального модуля.

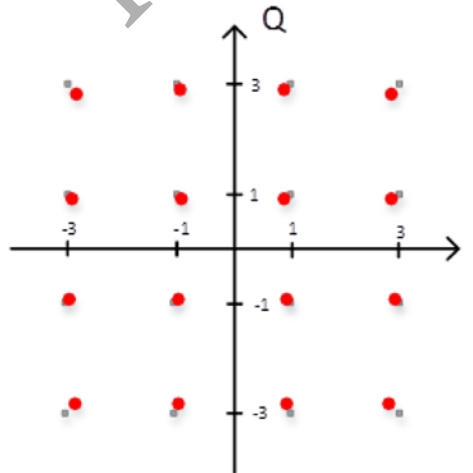


Рисунок 4.6 - Сигнальні сузір'я QAM-16 на виході підсилувача моделі при вхідній потужності 5 мВт

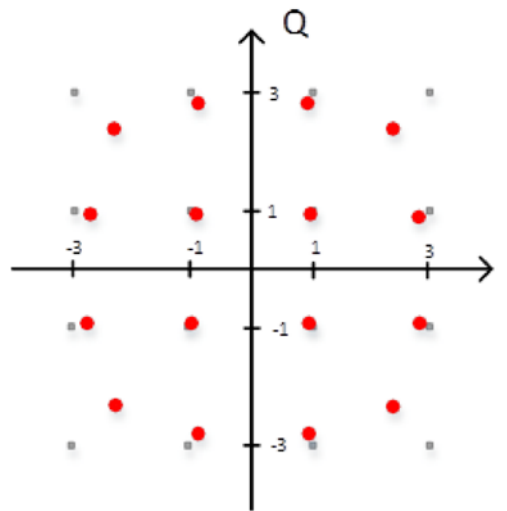


Рисунок 4.7 - Сигнальні сузір'я QAM-16 на виході підсилювача моделі при вхідній потужності 15 мВт

4.3 Лінійні спотворення сигнального сузір'я

Перейдемо до розгляду таких спотворень як розбаланс квадратур та усунення сигнального сузір'я. Для того, щоб отримати їх математичні моделі, наведемо аналітичний запис радіосигналу QAM-16:

$$S^i(t) = g_0(t)A_{kl} \cos(2\pi f_s t) + jg_0(t)A_{lQ} \sin(2\pi f_s t)$$

$$k, l \in 1.. \sqrt{M};$$

$$A_{kl}, A_{lQ} = \{2m-1-\sqrt{M}\};$$

$$g_0 = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{T}}; t \in [0, T] \\ 0; t \notin [0, T] \end{cases}$$

де $S^i(t)$ поточний стан сигнального вектора, що передається в даний момент символ сигнального сузір'я, A_{kl} A_{lQ} - його координати, f_s , - несуча частота радіосигналу, T - період символу, $g_0(t)$ - нормувальна функція. Введемо в аналітичну запис радіосигналу моделі спотворень зміщення сигнального сузір'я і розбаланса квадратур. Відповідно, отримуємо:

$$S^i(t) = g_0(t)(A_{ki} + ofs_i) \cos(2\pi f_s t) + jg_0(t)(A_{lQ} + ofs_Q) \sin(2\pi f_s t);$$

$$S^i(t) = g_0(t)A_{ki} \cos(2\pi f_s t + \varphi_{IMB}) + jg_0(t)A_{lQ} \sin(2\pi f_s t - \varphi_{IMB});$$

де ofs_i та ofs_Q - зміщення по квадратурних осях, φ_{IMB} - фазовий зсув. На рисунках 4.7, 4.8 і 4.9 приведені графічні ілюстрації спотворень.

Дані спотворення не становлять особливого інтересу або складності з точки зору їх реалізації в різних середовищах моделювання, включаючи MATLAB Simulink. Для моделювання даних спотворень у зазначеному програмному пакеті передбачено спеціалізований блок, завдяки чому процес введення в модель даних спотворень не становить інтересу [3].

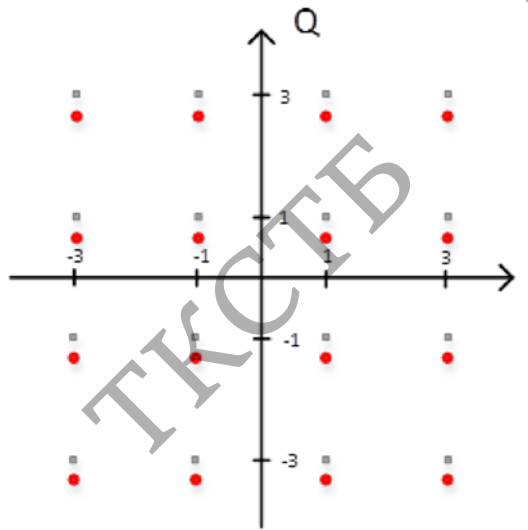


Рисунок 4.8 - Спотворені сигнальні сузір'я QAM-16: зсув

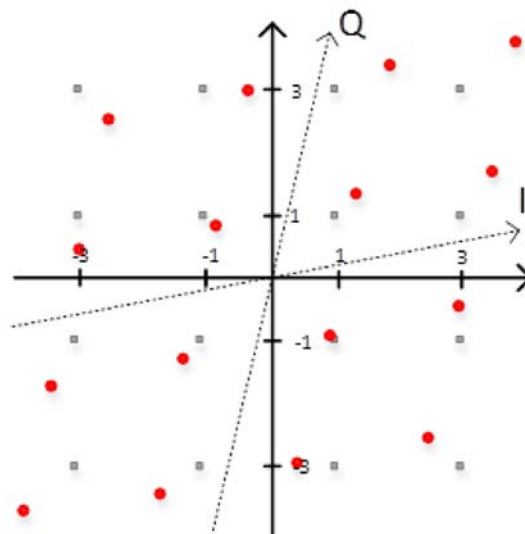


Рисунок 4.9 - Спотворені сигнальні сузір'я QAM-16: фазовий розбаланс квадратур

4.4 Ідентифікація спотворення на виході передавача

Як зазначалося, все вищеописані метрики у вигляді дають лише інформацію про ступеня спотвореності радіосигналу і, отже, про завадостійкість ТЗ, але про природу спотворення вони інформації не дають [4, 6]. Очевидно, що у разі обчислення на досить великому кадрі, однакові значення EVM можуть бути отримані шляхом введення в радіосигнал різних спотворень [5] (рисунки 4.10 та 4.11).

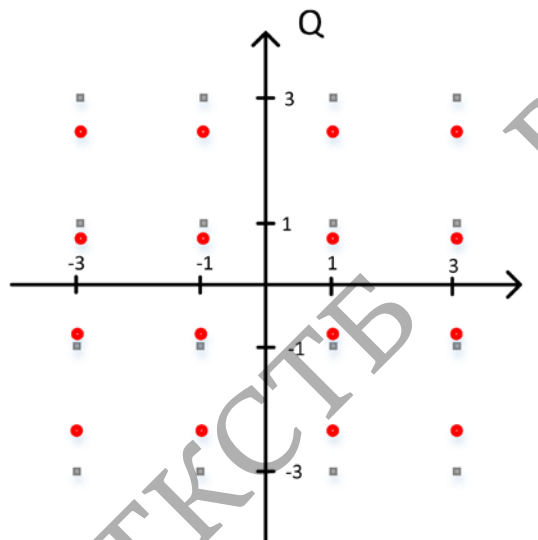


Рисунок 4.10 - Сузір'я QAM-16, спотворене амплітудним розбалансом;
величина вектора помилки EVM – 26%

Під великим кадром розуміється послідовність даних, при передачі якої всі символи сигнального сузір'я зустрічаються з приблизно рівною ймовірністю, а у разі, якщо в результаті введення спотворення при передачі різних символів вектор помилки різний, але не один із векторів не є порівнянним за своєю величиною із сумарною помилкою кадру.

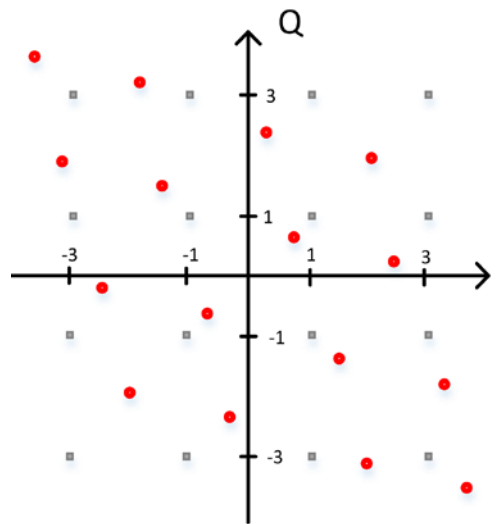


Рисунок 4.11 - Сузір'я, спотворене фазовим розбалансом; величина вектора помилки EVM – 26%

Поданий нижче вираз описує критерій, при якому довжина кадру, на якому обчислюється вектор помилок, буде відповідати описаній раніше умові.

$$|\vec{e}_{\max}|^2 \ll \sum_1^L |\vec{e}_i|^2$$

Для ідентифікації спотворення радіосигналу пропонується обчислювати усереднену метрику для кожного окремого символу всередині великого кадру або передавати кадри, що складаються з даних, що визначають один символ.

Проведемо наступний експеримент: скористаємося методикою для моделювання нелінійних спотворень підсилювача потужності, яка була наведена раніше, і створимо у програмному пакеті MATLAB керуючий скрипт. Даний скрипт запускатиме модель Simulink і визначатиме її параметри: потужність радіосигналу, що подається на підсилювач, швидкість передачі повідомлення і т. д. Інша його функція – передача даних на вхід моделей, тобто визначення, яка буде довжина кадру і на якій послідовності символів буде обчислено метрику оцінки якості радіосигналу [9].

На рисунку 4.12 наведено структурну схему описаної моделі.

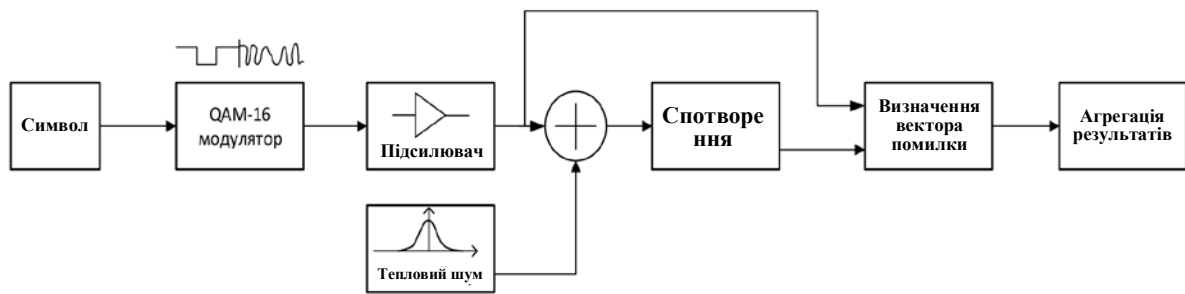


Рисунок 4.12 - Схема моделювання спотворень

Обчислимо послідовно усереднену величину вектора помилки кожного символу сигнального сузір'я. Довжина кадру, на яку проводиться розрахунок, дорівнює 4×10^7 біт (10^7 символів). На діаграмі нижче (рисунки 4.13, 4.14, 4.16, 4.17) наведено результати моделювання.

По вертикальній осі відкладено вектор помилок, виражений у відсотках, по фронтальній осі – номер символу, який відбиває його позицію сигнальному сузір'ї. Третя вісь відображає залежно від графіка або кут розбалансу квадратур, або потужність радіосигналу, що подається на підсилювач потужності.

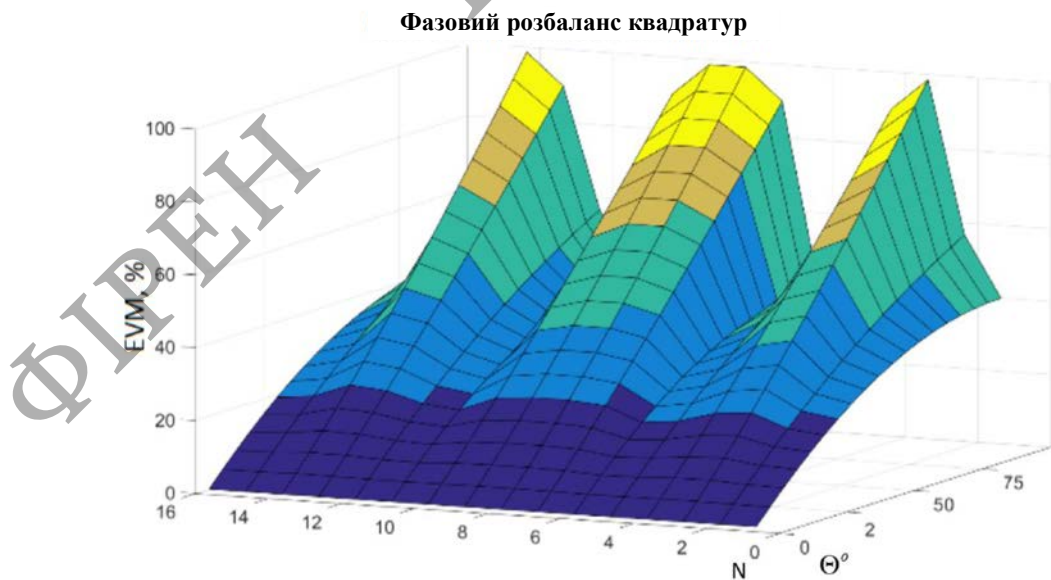


Рисунок 4.13 - Діаграма посимвольної зміни EVM в залежності від ступеня спотворення фазового розбалансу

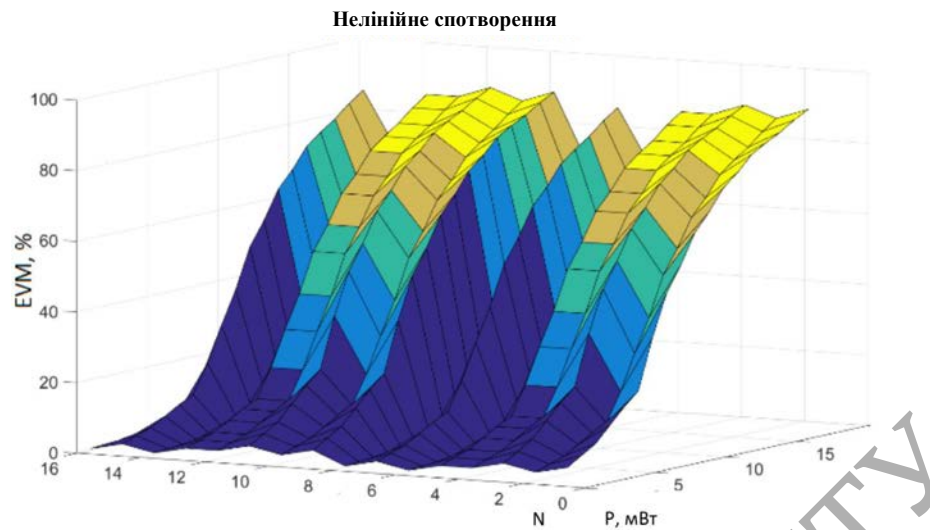


Рисунок 4.14 - Діаграма посимвольної зміни EVM в залежності від ступеня спотворення для нелінійного спотворення

З представлених діаграм видно очевидні відмінності у характері поведінки вектора помилки залежно від типу спотворення радіосигналу. Виникає необхідність сформулювати критерії, на основі яких можна розрізнити спотворення.

Для початку виділимо характерні особливості поведінки вектора помилок при кожному виді спотворення, визначимо символи, котрим величина вектора помилки буде максимальною чи мінімальною, і навіть характерні співвідношення з-поміж них [9, 11]. У разі фазового розбалансу найбільше спотворення піддаються символи з номерами 2, 7, 8, 13. Нумерація символів представлена на рисунку 4.15. Трохи менш спотворюються символи 3, 6, 9, 12.

У разі нелінійного спотворювального впливу ступінь спотворення визначається енергією символу, відповідно найбільше будуть спотворені символи 0, 2, 8, 10, а найменшому спотворенню будуть схильні до 5, 7, 13, 15.

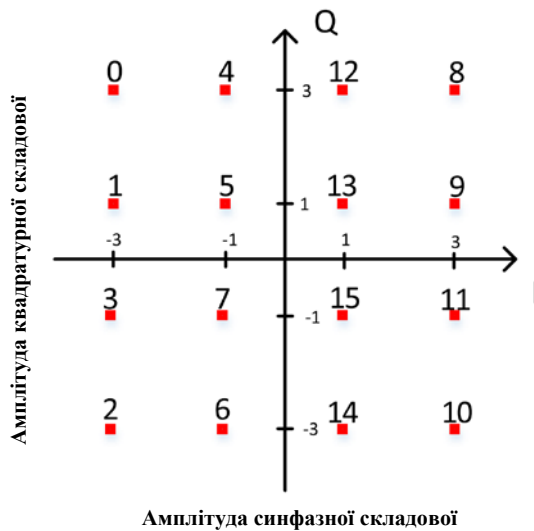


Рисунок 4.15 - Сигнальне сузір'я QAM-16

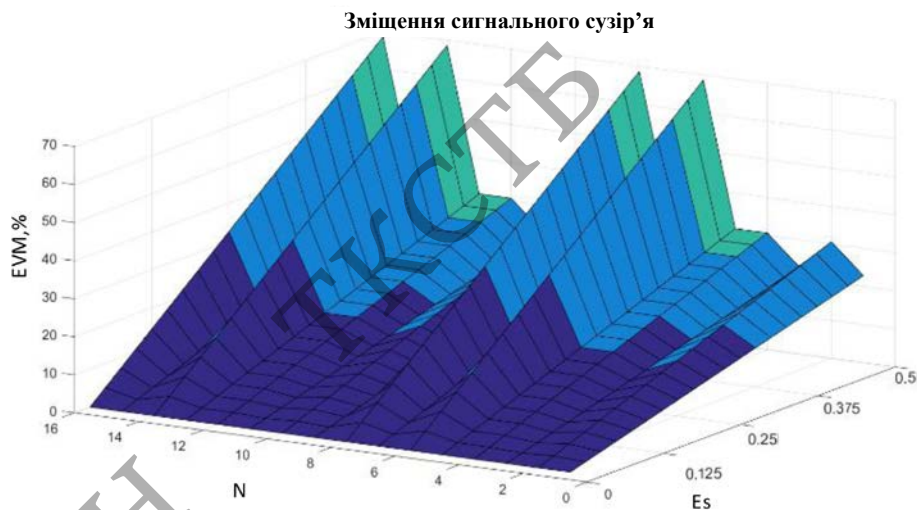


Рисунок 4.16 - Діаграма посимвольної зміни EVM в залежності від ступеня спотворення для зміщення сузір'я

Зазначимо, що при нелінійному спотворенні символи, що мають однакову енергію, спотворені однаково, незалежно від їхньої позиції у сигнальному сузір'ї, на відміну від фазового розбалансу (рис. 4.13) або амплітудного розбалансу (рис. 4.17).

Амплітудний розбаланс квадратур

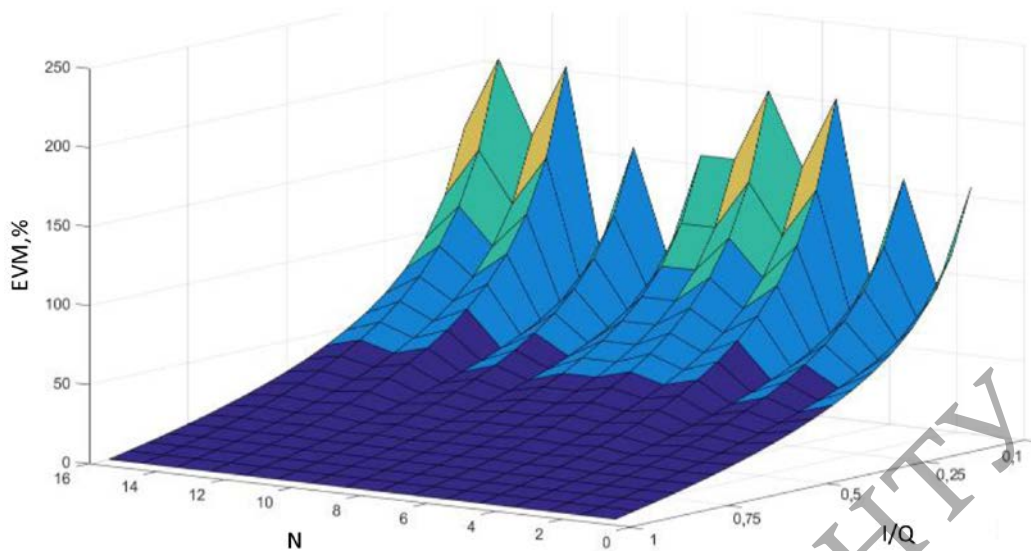


Рисунок 4.17 - Діаграма посимвольної зміни EVM в залежності від ступеня спотворення для амплітудного розбалансу квадратур

При амплітудному розбалансі, введеному шляхом стиснення квадратурної осі, максимально спотворені символи 4, 12, 6, 14. Це тим, що квадратурна складова переважає при формуванні символу і несе більшу частину його енергії.

Розглянемо докладніше роботу методики ідентифікації спотворення, що впливає на радіосигнал, та оцінки якості радіосигналу на виході передавача (рисунок 4.18). У першому етапі необхідно сформувані пакет тестових даних. Причому він повинен забезпечувати як достатню кількість символів, що передаються, так і необхідну рівномірність їх розподілу.

Докладніше основні особливості його формування було розглянуто на початку цього розділу.

Далі відбувається передача даних за допомогою пристрою, що тестується, і обчислюється вектор помилки з використанням опорного радіосигналу.

У разі, якщо усереднений вектор помилки не перевищує заданого значення, якість радіосигналу вважається задовільною, оскільки дана метрика розроблена для оцінки якості сигналів з цифровою багатопозиційною

модуляцією, в іншому випадку робиться спроба ідентифікувати спотворення, а якщо це не вдається, робиться висновок повідомлення про помилку.

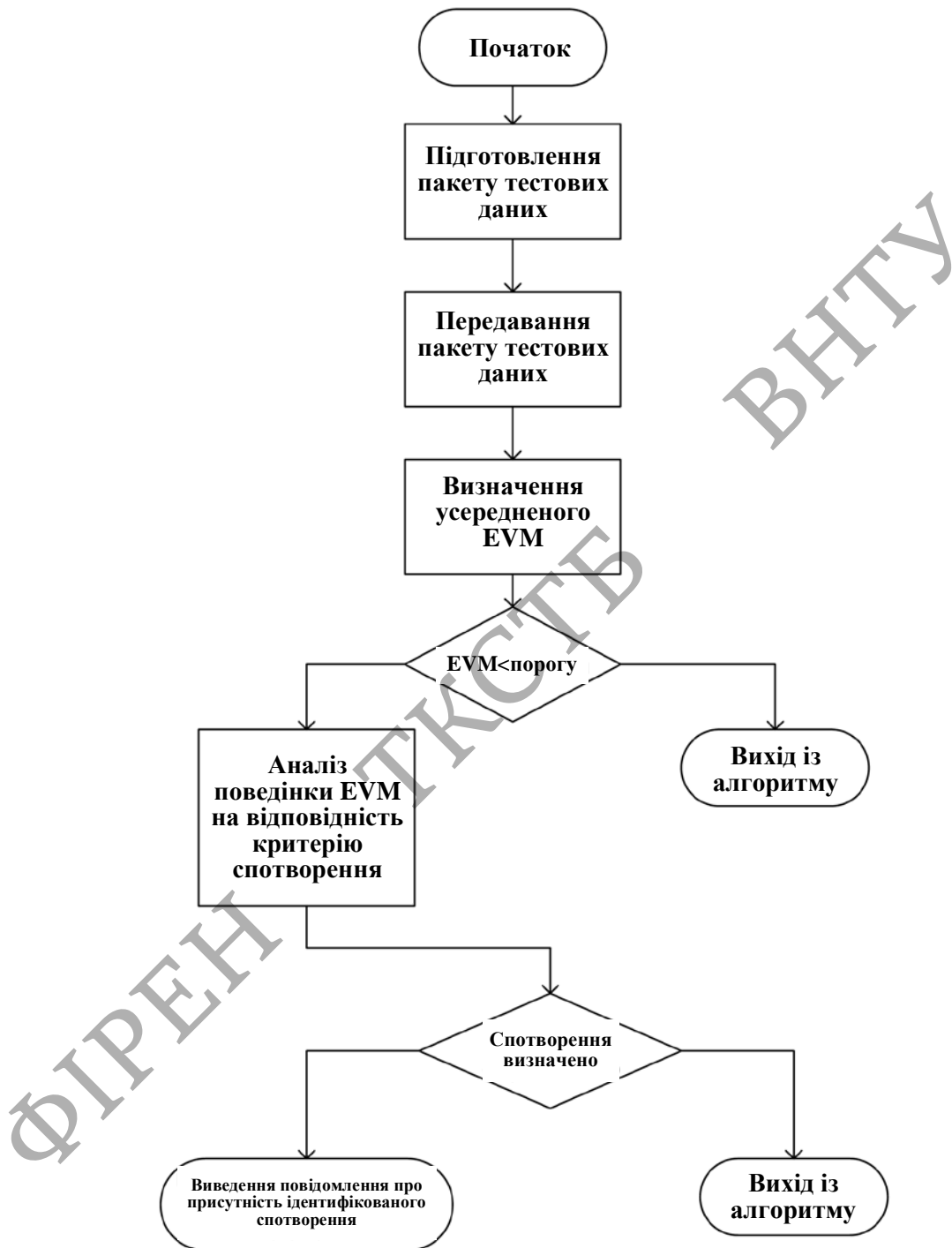


Рисунок 4.18 - Блок-схема роботи системи ідентифікації спотворень

Визначивши всі необхідні критерії розпізнавання основних типів спотворень і загальні принципи роботи системи ідентифікації, слід оцінити

ефективність роботи. Встановлено, що для наведеної вище підсилювальної характеристики Polyfet MLCQ-02 критерій успішно працює, починаючи з усередненої потужності, поданої на підсилювач і 0,03 дБм. Фазовий розбаланс детектується, починаючи з 10° . Для амплітудного розбалансу пороговим є відношення квадратур, що дорівнює 0,9 для зміщення сигнального сузір'я - 0,1 від половини мінімальної енергії символу.

На рисунку 4.19 наведено діаграму роботи критеріїв при різних похибках вимірювання EVM та шумової температури підсилювача, що дорівнює 290 К [1, 8].

Варто відзначити сильну залежність ідентифікації фазового і амплітудного розбалансу від похибки вимірювання, що закладається в методику.

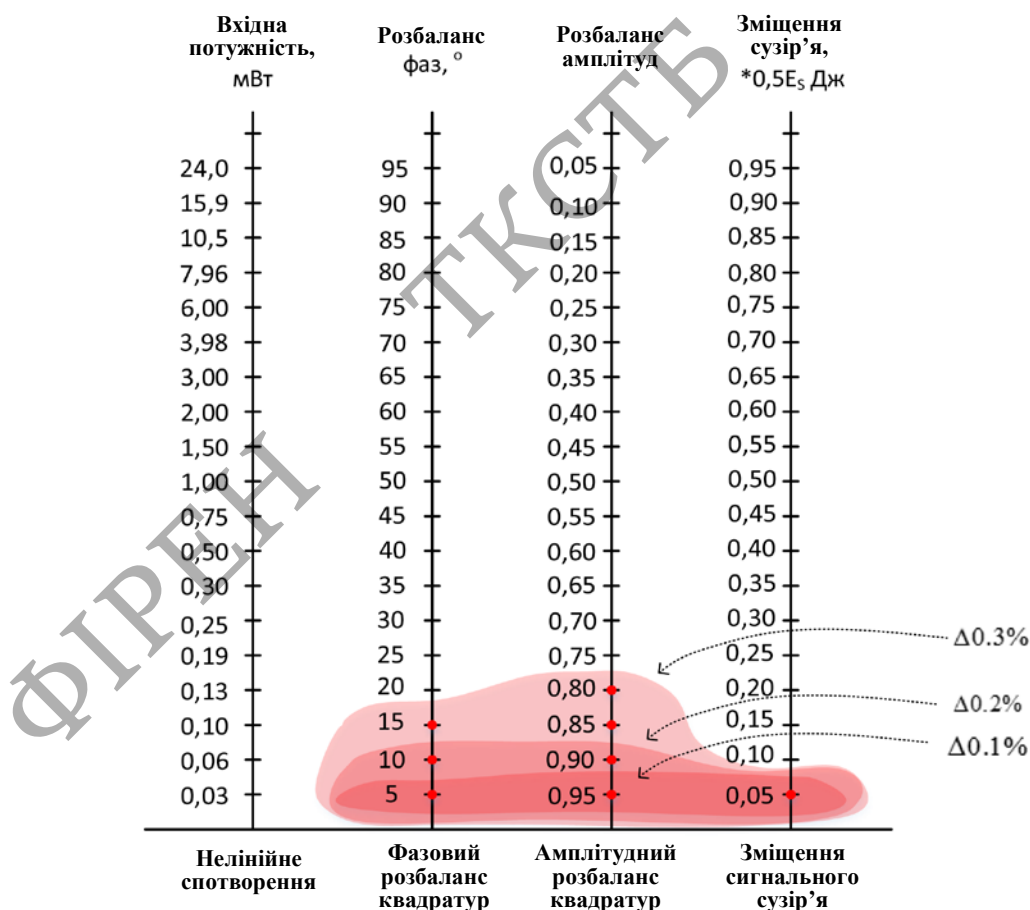


Рисунок 4.19 - Діаграма робочих областей критеріїв ідентифікації спотворень

Також важливим моментом є те, що, незважаючи на громіздкий запис логічних виразів, що описують критерії розпізнавання спотворень, вони можуть бути лаконічно та ефективно реалізовані за допомогою більшості програмованих мов.

4.5 Висновки до розділу 4

Запропоновано методику ідентифікації спотворення на виході передавача при аналізі радіосигналу з модуляцією QAM-16, в основі якої лежить обчислення вектора помилки та аналіз поведінки при передачі різних символів даного сигнального сузір'я.

Наведено критерії ідентифікації на основі системи несумісних нерівностей, які дозволяють провести ідентифікацію основних типів спотворень сигнального сузір'я. Проведено серії статистичних експериментів у середовищі моделювання для підтвердження ефективності та оцінки запропонованої методики ідентифікації спотворень, в результаті чого виявлено чутливість запропонованої методики до точності вимірювання вектора помилки, яка в даному випадку визначається розміром кадру, на якому обчислювали цей вектор.

Встановлено, що межа спрацьовування визначається захисним інтервалом дозволу D , що вводиться в нього. При збільшенні захисного інтервалу можливе перетинання областей розв'язків нерівностей, що призведе до відсутності можливості однозначно ідентифікувати спотворення, що впливає на сигнал. При послідовному збільшенні цього інтервалу найбільше погіршення показників роздільної здатності запропонованої методики спостерігається при ідентифікації фазового та амплітудного розбалансу. Точність ідентифікації нелінійного спотворення сигнального сузір'я під впливом підсилювальної характеристики та усунення сигнального сузір'я продемонстрували меншу залежність зі збільшенням захисного інтервалу.

Наведено метод перенесення підсилювальної характеристики апаратних модулів у середу MATLAB Simulink з використанням одного з найпоширеніших

видів апроксимації підсилювальної характеристики кубічним поліномом. Запропонований метод дозволяє створити в середовищі моделювання блок підсилювача, характеристики якого відповідають заявленим документації на обраний підсилювальний модуль, що забезпечує максимально наближену до фізичного прототипу поведінку моделі у вибраному середовищі моделювання.

ФІРЕН

ТКСТБ

ВНТУ

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Виконання науково-дослідної роботи завжди передбачає отримання певних результатів і вимагає відповідних витрат. Результати виконаної роботи завжди дають нам нові знання, які в подальшому можуть бути використані для удосконалення та/або розробки (побудови) нових, більш продуктивних зразків техніки, процесів та програмного забезпечення.

Дослідження на тему «Підвищення завадостійкості та інформаційної ефективності телекомунікаційних радіосистем» може бути віднесено до фундаментальних і пошукових наукових досліджень і спрямоване на вирішення наукових проблем, пов'язаних з практичним застосуванням. Основою таких досліджень є науковий ефект, який виражається в отриманні наукових результатів, які збільшують обсяг знань про природу, техніку та суспільство, які розвивають теоретичну базу в тому чи іншому науковому напрямку, що дозволяє виявити нові закономірності, які можуть використовуватися на практиці.

Для цього випадку виконаємо такі етапи робіт:

- 1) здійснимо проведення наукового аудиту досліджень, тобто встановлення їх наукового рівня та значимості;
- 2) проведемо планування витрат на проведення наукових досліджень;
- 3) здійснимо розрахунок рівня важливості наукового дослідження та перспективності, визначимо ефективність наукових досліджень.

5.1 Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «Підвищення завадостійкості та інформаційної ефективності телекомунікаційних радіосистем» можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

Значення показників ступеня новизни і рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи в балах наведені в табл. 5.1 та 5.2.

Таблиця 5.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи виставлені експертами

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПШБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	0	0	0
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	54	54	55
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	0	0	0
Традиційна	Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки. Знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим	0	0	0
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	0	0	0
Середнє значення балів експертів		54,3		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як нова, тобто отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних знань (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту) та проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів.

Таблиця 5.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	0	0	0
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	60	60	60
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	0	0	0
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	0	0	0
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	0	0	0
Середнє значення балів експертів	60,0		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів рівень теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи характеризується як глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу.

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [27]:

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (5.1)$$

де $k_{\text{нов}}$, $k_{\text{теор}}$ - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, $k_{\text{нов}} = 54,3$, $k_{\text{теор}} = 60,0$ балів;
 $0,6$ та $0,4$ – питома вага (значимість) показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи.

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}} = 0,6 \cdot 54,3 + 0,4 \cdot 60,00 = 56,60 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника $E_{\text{нау}}$ проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

Досягнутий рівень показника	Кількість балів
Високий	70...100
Середній	50...69
Достатній	15...49
Низький (помилкові дослідження)	1...14

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Підвищення завадостійкості та інформаційної ефективності телекомунікаційних радіосистем», даний рівень становить 56,60 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

5.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Підвищення завадостійкості та інформаційної ефективності телекомунікаційних радіосистем», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

5.2.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників (Z_o) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [27]:

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (5.2)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

M_{ni} – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, грн;

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, $T_p=22$ дні.

$$Z_o = 11780,00 \cdot 15 / 22 = 8031,82 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Керівник	11780,00	535,45	15	8031,82
Інженер-розробник телекомунікаційних систем	10230,00	465,00	15	6975,00
Науковий співробітник	11110,00	505,00	7	3535,00
Лаборант	6500,00	295,45	10	2954,55
Всього				21496,36

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Підвищення завадостійкості та інформаційної ефективності телекомунікаційних радіосистем» розраховуємо за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (5.3)$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

t_i – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (5.4)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo $M_M=2379,00$ грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [27];

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середнє число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 22$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 2379,00 \cdot 1,10 \cdot 1,65 / (22 \cdot 8) = 24,53 \text{ грн.}$$

$$Z_{p1} = 24,53 \cdot 1,50 = 36,80 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Встановлення телекомунікаційного устаткування	1,50	2	1,10	24,53	36,80
Інсталяція програм імітації передавачів	1,50	5	1,70	37,92	56,87
Інсталяція програм імітації приймачів	1,00	4	1,50	33,45	33,45
Моделювання обладнання формування завод	8,00	2	1,10	24,53	196,27
Підготовка приміщення для досліджень	8,00	4	1,50	33,45	267,64
Налаштування устаткування системи створення завод	2,00	5	1,70	37,92	75,83
Демонтаж обладнання	2,00	3	1,35	30,11	60,22
Всього					727,08

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$Z_{\text{дод}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{N_{\text{дод}}}{100\%}, \quad (5.5)$$

де $N_{\text{дод}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Приймемо 12%.

$$Z_{\text{дод}} = (21496,36 + 727,08) \cdot 12 / 100\% = 2666,81 \text{ грн.}$$

5.2.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою:

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{од}}) \cdot \frac{H_{zn}}{100\%} \quad (5.6)$$

де H_{zn} – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (21496,36 + 727,08 + 2666,81) \cdot 22 / 100\% = 5475,86 \text{ грн.}$$

5.2.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Підвищення завадостійкості та інформаційної ефективності телекомунікаційних радіосистем».

Витрати на матеріали на даному етапі проведення досліджень в основному пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментальних математичних моделей або програмного забезпечення, тому дані витрати формуються на основі витратних матеріалів характерних для офісних робіт.

Витрати на матеріали (M), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{\text{в}j}, \quad (5.7)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n – кількість видів матеріалів;

C_j – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

C_{ej} – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 3,00 \cdot 88,00 \cdot 1,1 - 0,000 \cdot 0,00 = 290,40 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Папір офісний	88,00	3,00	0,000	0,00	290,40
Приладдя канцелярське	120,00	4,00	0,000	0,00	528,00
Тонер для картриджа Canon LaserIQ	5170,00	0,02	0,000	0,00	113,74
Папір для записів	39,00	2,00	0,000	0,00	85,80
Органайзер	215,00	3,00	0,000	0,00	709,50
Диск оптичний	11,80	3,00	0,000	0,00	38,94
Всього					1766,38

5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_e), які використовують при проведенні НДР на тему «Підвищення завадостійкості та інформаційної ефективності телекомунікаційних радіосистем», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_e = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (5.8)$$

де H_j – кількість комплектуючих j -го виду, шт.;

C_j – покупна ціна комплектуючих j -го виду, грн;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$).

$$K_e = 1 \cdot 650,00 \cdot 1,1 = 715,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Формувач завод радіомережі	1	650,00	715,00
Всього			715,00

5.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.і}} \cdot K_i, \quad (5.9)$$

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{пр.і}}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1,10 \dots 1,12$);

k – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 1890,00 \cdot 1 \cdot 1,1 = 2079,00 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 5.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Кодер сигналу	1	1890,00	2079,00
Декодер сигналу	1	1670,00	1837,00
Всього			3916,00

5.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

$$V_{\text{прог}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{инрг}} \cdot C_{\text{прог.}i} \cdot K_i, \quad (5.10)$$

де $C_{\text{инрг}}$ – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{\text{прог.}i}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування,

які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$V_{\text{прог}} = 7520,00 \cdot 1 \cdot 1,1 = 8272,00 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 5.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
ОС Windows	1	7520,00	8272,00
Прикладний пакет Microsoft Office	1	5100,00	5610,00
Пакет Visual System Simulator	1	4360,00	4796,00
Пакет Microwave Office	1	3600,00	3960,00
Пакет MATLAB SIMULINK	1	3140,00	3454,00
Всього			26092,00

5.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{обл} = \frac{Ц_{б} \cdot t_{вик}}{T_{е} \cdot 12}, \quad (5.11)$$

де $Ц_{б}$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_{е}$ – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (18900,00 \cdot 1) / (2 \cdot 12) = 787,50 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Персональний комп'ютер	18900,00	2	1	787,50
Програмно-аналітичний центр обробки та виводу даних	23640,00	2	1	985,00
Місце дослідника-оператора	7640,00	5	1	127,33
Оргтехніка відображення результатів	8230,00	4	1	171,46
Приміщення лабораторії	190000,00	20	1	791,67
Всього				2862,96

5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (5.12)$$

де W_{yi} – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo $C_e = 4,10$ грн;

K_{eni} – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{eni} < 1$;

η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

$$B_e = 0,32 \cdot 100,0 \cdot 4,10 \cdot 0,95 / 0,97 = 131,20 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Персональний комп'ютер	0,32	100,0	131,20
Програмно-аналітичний центр обробки та виводу даних	0,45	100,0	184,50
Місце дослідника-оператора	0,20	100,0	82,00
Оргтехніка відображення результатів	0,70	15,0	43,05
Формувач завод радіомережі	0,02	40,0	3,28
Всього			444,03

5.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Підвищення заводостійкості та інформаційної ефективності телекомунікаційних радіосистем» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуємо як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{cb} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cb}}{100\%}, \quad (5.13)$$

де H_{cb} – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», прийmemo $H_{cb} = 25\%$.

$$B_{cs} = (21496,36 + 727,08) \cdot 25 / 100\% = 5555,86 \text{ грн.}$$

5.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» розраховуємо як 30...45% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (5.14)$$

де H_{cn} – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», прийmemo $H_{cn} = 35\%$.

$$B_{cn} = (21496,36 + 727,08) \cdot 35 / 100\% = 7778,21 \text{ грн.}$$

5.2.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$I_e = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ie}}{100\%}, \quad (5.15)$$

де H_{ie} – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo $H_{ie} = 60\%$.

$$I_e = (21496,36 + 727,08) \cdot 60 / 100\% = 13334,07 \text{ грн.}$$

5.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (5.16)$$

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo $H_{нзв} = 110\%$.

$$B_{нзв} = (21496,36 + 727,08) \cdot 110 / 100\% = 24445,79 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Підвищення завадостійкості та інформаційної ефективності телекомунікаційних радіосистем» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{одд} + Z_n + M + K_v + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_e + B_{нзв}. \quad (5.17)$$

$$B_{\text{заг}} = 21496,36 + 727,08 + 2666,81 + 5475,856974 + 1766,38 + 715,00 + 3916,00 + 26092,00 + 2862,96 + 444,03 + 5555,86 + 7778,21 + 13334,07 + 24445,79 = 117276,41 \text{ грн.}$$

Загальні витрати ZB на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою:

$$ZB = \frac{B_{\text{заг}}}{\eta}, \quad (5.18)$$

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta = 0,9$.

$$ZB = 117276,41 / 0,9 = 130307,12 \text{ грн.}$$

5.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

Оцінювання та доведення ефективності виконання науково-дослідної роботи фундаментального чи пошукового характеру є достатньо складним процесом і часто базується на експертних оцінках, тому має вірогідний характер.

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Підвищення завадостійкості та інформаційної ефективності телекомунікаційних радіосистем» використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

Комплексний показник K_p рівня науково-дослідної роботи може бути розрахований за формулою:

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t}, \quad (5.19)$$

де I – коефіцієнт важливості роботи. Прийmemo $I = 3$;

n – коефіцієнт використання результатів роботи; $n = 0$, коли результати роботи не будуть використовуватись; $n = 1$, коли результати роботи будуть використовуватись частково; $n = 2$, коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках; $n = 3$, коли результати можуть використовуватись навіть без проведення дослідно-конструкторських розробок. Прийmemo $n = 2$;

T_c – коефіцієнт складності роботи. Прийmemo $T_c = 3$;

R – коефіцієнт результативності роботи; якщо результати роботи плануються вище відомих, то $R = 4$; якщо результати роботи відповідають відомому рівню, то $R = 3$; якщо нижче відомих результатів, то $R = 1$. Прийmemo $R = 3$;

B – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo $B = 130307,12$ грн;

t – час проведення дослідження. Прийmemo $t = 0,08$ років, (1 міс.).

Визначення показників I, n, T_c, R, B, t здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [27].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t} = \frac{3^2 \cdot 3 \cdot 3}{130 \cdot 0,08} = 7,46.$$

Якщо $K_p > 1$, то науково-дослідну роботу на тему «Підвищення завадостійкості та інформаційної ефективності телекомунікаційних радіосистем» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

5.4 Висновок до розділу 4

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Підвищення завадостійкості та інформаційної ефективності телекомунікаційних радіосистем» складають 130307,12 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Підвищення завадостійкості та інформаційної ефективності телекомунікаційних радіосистем» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи $K_p > 1$, що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Розвиток охорони праці сприяє становленню економічного розвитку як на підприємстві так і в країні в цілому. Чим безпечніші умови праці, тим менші ризики нещасних випадків на виробництві. Тому можна відзначити, що безпечне виконання робіт є важливим аспектом будь-якого робочого процесу.

Дослідження підвищення завадостійкості та інформаційної ефективності телекомунікаційних радіосистем відбуватиметься в приміщенні, яке обладнане комп'ютеризованими робочими місцями. На розробника, згідно ГОСТ 12.0.003-74 [29], мали вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищена чи понижена вологість повітря; підвищений рівень статичної електрики; підвищений рівень електромагнітного випромінювання; недостатня освітленість робочої зони; відсутність чи нестача природного освітлення.

2. Психофізіологічні: розумове перевантаження; перенапруга аналізаторів; статичне перевантаження.

6.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

6.1.1 Обладнання приміщення та робочого місця

Організація робочого місця – це система заходів щодо його спеціалізації, оснащення необхідними засобами і предметами праці, їхнього розміщення на робочому місці, його зовнішнього оформлення і створення належних умов праці. Конкретний зміст цих заходів визначається характером і спеціалізацією робочого місця, його видом і значенням у виробничому процесі.

Робоче місце працівника складається зі столу, крісла і підніжки, які дають змогу зберігати раціональну робочу позу впродовж усього робочого дня.

Конструкція робочого столу відповідає сучасним вимогам ергономіки і забезпечує оптимальне розміщення на робочій поверхні використовуваного обладнання (дисплея, клавіатури, принтера) і документів.

Робочий стілець підйомно-поворотний з можливістю регулювання за висотою та кутом нахилу сидіння та спинки. Поверхня сидіння плоска, передній край - заокруглений. Регулювання за кожним із параметрів здійснюється незалежно, легко і надійно фіксується.

Конструкція робочого місця користувача ПК має забезпечувати підтримання оптимальної робочої пози з такими ергономічними характеристиками:

- ступні ніг – на підлозі або на підставці для ніг;
- стегна – в горизонтальній площині;
- передпліччя – вертикально;
- лікті – під кутом 70 – 90 град. до вертикальної площини;
- зап'ястя зігнуті під кутом не більше 20 град. відносно горизонтальної площини,
- нахил голови – 15 – 20 град. відносно вертикальної площини [33].

Розташування екрана ВДТ забезпечує зручність зорового спостереження у вертикальній площині під кутом $+30^\circ$ до нормальної лінії погляду дослідника.

Висота робочої поверхні столу для ПК знаходиться в межах 680 – 800 мм, а ширина – забезпечує можливість виконання операцій в зоні досяжності моторного поля.

У приміщеннях з персональними комп'ютерами слід щоденно проводити вологе прибирання. Також в цих приміщеннях повинні бути медичні аптечки першої допомоги.

6.1.2 Електробезпека приміщення

Лінія електромережі для живлення персональних комп'ютерів, їх периферійних пристроїв (принтер, сканер тощо) в приміщенні виконана як окрема групова трипровідна мережа, шляхом прокладання фазового, нульового робочого та нульового захисного провідників. Нульовий захисний провідник використовується для заземлення (занулення) електроприймачів.

Нульовий захисний провід прокладено від стійки групового розподільчого щита, розподільчого пункту до розеток живлення. Не допускається підключення на щиті до одного контактного затискача нульового робочого та нульового захисного провідників [34].

Усі провідники відповідають номінальним параметрам мережі та навантаження, умовам навколишнього середовища, умовам розподілу провідників, температурному режиму тощо.

Персональні комп'ютери, периферійні пристрої до електромережі тільки з допомогою справних штепсельних з'єднань і електророзеток заводського виготовлення. Штепсельні з'єднання та електророзетки крім контактів фазового та нульового робочого провідників мають спеціальні контакти для підключення нульового захисного провідника. Конструкція їх має бути такою, щоб приєднання нульового захисного провідника відбувалося раніше ніж приєднання фазового та нульового робочого провідників. Порядок роз'єднання при відключенні має бути зворотним. Необхідно унеможливити з'єднання контактів фазових провідників з контактами нульового захисного провідника. Неприпустимим є підключення комп'ютерів, периферійних пристроїв до звичайної двопровідної електромережі, в тому числі – з використанням перехідних пристроїв.

Категорія умов з небезпеки електротравматизму – без підвищеної небезпеки [35].

Для запобігання електротравмам у приміщенні здійснюються:

- 1) ізоляція нормально струмоведучих елементів електроустаткування відповідно з вимогами нормативів;
- 2) захисне заземлення;
- 3) систематичне проходження інструктажу з електробезпеки.

6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

6.2.1 Мікроклімат

На самопочуття та стан здоров'я людини впливає мікроклімат виробничих приміщень, який визначається дією на організм людини температури, вологості, рухомості повітря і теплового випромінювання. Виробничий мікроклімат, як правило, відрізняється значною мінливістю, нерівномірністю по горизонталі та вертикалі, різноманітністю сполучень температури, вологості, рухомості повітря, інтенсивності випромінювання залежно від особливостей технології виробництва, кліматичних особливостей місцевості, конструкцій споруд, організації повітрообміну із зовнішнім середовищем.

Робота дослідника підвищення завадостійкості та інформаційної ефективності телекомунікаційних радіосистем відноситься до категорії легких робіт Іа. В табл. 6.1. наведені оптимальні параметри мікроклімату в приміщеннях, де виконуються роботи операторського типу.

Таблиця 6.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	55	0,1-0,2
Холодний	21-25	75	0,1

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату в приміщенні передбачено загальне опалення будівлі та заходи з утеплення зовнішніх стін будівлі. Крім того, забезпечення допустимих метеорологічних

умов праці в приміщенні здійснюється за допомогою системи припливно-втяжної вентиляції та регулярного провітрювання.

6.2.2 Склад повітря робочої зони

Нормуються шкідливі речовини у повітря робочої зони згідно ДСН 3.3.6.042-99 [32].

Гранично допустимі концентрації (ГДК) шкідливих речовин для повітря робочої зони під час розробки інформаційної технології захисту даних в «хмарних» комп'ютерних обчисленнях наведені у таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони.

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньодобова	
Озон	0,16	0,01	1
Вуглекислий газ (CO ₂)	3	1	4
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

Для забезпечення складу повітря робочої зони здійснюється видалення шкідливих речовин, що потрапляють у повітря робочої зони, за рахунок механічної вентиляції. Кількість пилу, що наявна в приміщенні, зменшується за допомогою систематичного вологого прибирання.

6.2.3 Виробниче освітлення

У приміщенні, де виконуються дослідження використовується штучне та природне освітлення.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні, які необхідно

забезпечити під час виконання роботи зазначені у таблиці 6.3 (відповідно ДБН В.2.5-28-2006 [31]):

Таблиця 6.3 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, Лк		КПО, %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє	Бокове	Верхнє або верхнє	Бокове
Дуже високої точності	Від 0,15 до 0,3	II	г	великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5

Для забезпечення достатнього освітлення передбачені такі заходи:

1. Відносно вікон робоче місце розміщене так, щоб природне світло було з лівого боку.
2. Робоче місце дослідника, обладнане ПК розташоване так, щоб уникнути попадання в очі прямого світла.
3. Джерела штучного світла розташовані з обох сторін від екрану паралельно напрямку зору.
4. Щоб уникнути світових блисків від екрану, клавіатури, освітлювальних пристроїв, сонця в напрямку очей необхідно застосовувати антиблискові сітки, спеціальні фільтри для екрану, захисні козирки, жалюзі на вікнах.
5. Вікна приміщень повинні мати регульовальні пристрої для відкривання.

6.2.4 Виробничий шум

У робочому приміщенні мають місце шуми механічного і аеродинамічного походження, широкосмугові із аперіодичним підсиленням при роботі принтерів.

Допустимі рівні звукового тиску та рівні звуку L_A під час роботи згідно з вимогами ДСН 3.3.6.037-99 [32] наведені у таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного шуму

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Виробничі приміщення	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Для забезпечення допустимих параметрів шуму в приміщенні передбачено використання звукопоглинаючих матеріалів та пасивного охолодження ПК.

6.2.5 Виробничі випромінювання

Ступінь впливу електромагнітних випромінювань на організм людини залежить від діапазону частот, інтенсивності впливу відповідних чинників, тривалості опромінення, характеру випромінювання, режиму опромінення, розмірів поверхні тіла, яка опромінюється, та індивідуальних особливостей організму.

Під час проведення досліджень на ПК на працівника діє електромагнітне випромінювання (ЕМВ), що створюється ПК. Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань від монітору комп'ютера представлені в табл. 6.5.

Таблиця 6.5 – Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

Найменування параметра	Допустимі значення
Напруженість електричної складової електромагнітного поля на відстані 50 см від поверхні відеомонітору	10 В/м
Напруженість магнітної складової електромагнітного поля на відстані 50 см від поверхні відеомонітору	0,3 А/м
Напруженість електростатичного поля не повинна перевищувати:	для дорослих користувачів 20кВ/м для дітей 15кВ/м

Заходи щодо зменшення впливу на працівника електромагнітного випромінювання: оптимальна організація робочого місця, доцільне розміщення технологічного устаткування, дотримання гігієнічно-обґрунтованих режимів праці та відпочинку, зменшення часу перебування у зоні опромінення.

6.2.6 Психофізіологічні фактори

Можлива психоемоційна напруга при тривалій роботі з екраном відеомонітору, тому для забезпечення безпечності праці пропонуються наступні рішення:

Працюючі за комп'ютером повинні дотримуватися наступного режиму праці:

При введенні даних, читанні інформації з екрану безперервна тривалість роботи не повинна перевищувати 4-х годин при 8-годинному робочому дні;

Через кожну годину роботи необхідно робити перерву на 5-10 хвилин, а через 2 години на 15 хвилин;

Перерви використовувати для зорового та фізичного розвантажування:

Стоячи або сидячи робити похитування головою ліворуч-праворуч (темп швидкий);

Стоячи або сидячи робити нахили голови уперед-назад (темп помірний);

Масаж лоба, злегка його погладжуючи, а також погладжуючи ділянки над бровами у напрямку до скронь;

Стоячи або сидячи проводити самомасаж шиї та потилиці, погладжуючи потилицю та шию у напрямку до торса;

6.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи телекомунікаційної радіосистеми в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

Забезпечення стійкості роботи телекомунікаційних систем у НС базується на комплексі організаційних, інженерно-технічних заходів і засобів, спрямованих на збереження працездатності в умовах дії загрозливих чинників. Для цього необхідно: прогнозувати та оцінити можливі наслідки; заздалегідь спланувати заходи із запобігання та зменшення вірогідності виникнення НС і скорочення масштабів прояву результатів НС; організація робіт в умовах НС та ліквідація її наслідків.

Розроблювану телекомунікаційну радіосистему призначено для обробки і передачі інформації також під час надзвичайних ситуацій, у воєнний та надзвичайний стан. Також, такі радіосистеми являють собою сукупність організаційних і технічних засобів для обробки інформації з метою забезпечення інформаційних потреб користувачів.

Одним з загрозливих чинників для телекомунікаційної радіосистеми є електромагнітний імпульс (ЕМІ). Уражаюча дія ЕМІ в приземній області й на землі пов'язана з акумулюванням його енергії довгими металевими предметами, рамними і каркасними конструкціями, антенами, лініями електропередачі та зв'язку, в них виникають сильні наведені струми, які руйнують підключене електронне та інше чутливе устаткування. У районі дії ЕМІ безпосередній контакт людини зі струмопровідними предметами теж є небезпечний.

Безвідмовність телекомунікаційної радіосистеми зв'язку – це властивість зберігати працездатність при її використанні в процесі передачі даних. Порядок

цим поява відмов телекомунікаційної радіосистеми пов'язана з тим, що в деякі моменти часу роботи може виникнути відмова деяких елементів радіосистеми обмеженого доступу в наслідок порушення дієздатності апаратної частини радіосистеми зв'язку. Дані порушення можуть виникнути при нестійкому живленні, що виникає в наслідок дії електромагнітного імпульсу, іонізуючого випромінювання та інших факторів надзвичайних ситуацій.

Як наслідок, телекомунікаційна мережа може бути використана у якості радіосистеми збору інформації для швидкого прийняття рішень у НС, тому необхідно дослідити вплив загрозливих чинників на роботу та розробити заходи, які сприятимуть підвищенню стійкості її роботи.

6.3.1 Дослідження стійкості роботи телекомунікаційної радіосистеми в умовах дії іонізуючих випромінювань

Мережа передачі даних поєднує програмну та апаратну частину засобів зв'язку, тому загрозливі чинники є досить різноманітними. Загрозливі чинники, що впливають на безпеку роботи телекомунікаційної радіосистеми здебільшого можна віднести до чинників техногенного та воєнного характеру.

Визначаємо граничні значення дози опромінення $D_{грi}$, для елементної бази елементів радіосистеми, при яких виникають незворотні зміни. Отримані дані заносимо в таблицю 6.6.

Проаналізувавши дані таблиці 6.6, визначили, що самим уразливим елементом блоків телекомунікаційної радіосистеми з мінімальною дозою $D_{грi} = 10^4 P$ є такі як транзистори та діоди. Визначаємо можливу дозу опромінення за формулою:

$$D_m = \frac{2 \cdot P_1 (\sqrt{t_k} - \sqrt{t_n})}{K_{осл}}, \quad (6.1)$$

де P_1 – максимальне значення рівня радіації (5,47 Р/год);

t_k – час кінця опромінення ($t_k = 43800$ год);

t_p – час початку опромінення (1 год).

$K_{осл}$ – коефіцієнт послаблення радіації ($K_{осл}=2$).

Таблиця 6.6 – Граничні значення експозиційних доз елементів радіосистеми.

Блоки телекомунікаційної радіосистеми	Елементи блоків	$D_{грi}, P$	$D_{гр}, P$
Блок перетворення сигналів	Мікросхема LM317	10^5	10^4
	Діод 1N4004	10^4	
	Резистор С2-23	10^7	
Блок формування сигналу і програмування	Конденсатор К50-6	10^4	
	Діод 1N4148	10^4	
	Резистор С2-33	10^7	
	Транзистор 2SA1271	10^4	
Блок обробки сигналу	Резистор С2-29В	10^8	
	Транзистор 2SA1271	10^4	

$$D_M = \frac{2 \cdot 5,47 \cdot (\sqrt{40000} - \sqrt{1})}{2} = 1273,6 \text{ (P)}.$$

Оскільки $D_{грi} > D_M$, то дана система стійка до дії радіації. Визначимо допустимий час роботи телекомунікаційної радіосистеми в заданих умовах за формулою:

$$t_d = \frac{D_{гр} \cdot K_{осл} + 2 \cdot P_1 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot P_1}, \quad (6.2)$$

$$t_d = \left(\frac{10^4 \cdot 2 + 2 \cdot 5,47 \sqrt{1}}{2 \cdot 5,47} \right)^2 = 23127 \text{ (год)}.$$

Отже, можлива доза опромінення елементної бази $D_M=1273,6$ P, а допустима - 10^4 P. Отже, телекомунікаційна мережа буде стійкою в умовах дії

іонізуючого випромінювання. Допустимий час роботи телекомунікаційної радіосистеми в заданих умовах становить 23127 год., при рівні радіації 5,47 Р/год.

6.3.2 Дослідження стійкості роботи телекомунікаційної радіосистеми в умовах дії електромагнітного імпульсу

Початковими даними є:

1) Вертикальна складова напруженості електричного поля: $E_B = 12$ кВ/м

2) $U_{жк} = 48$ В

1. Визначимо горизонтальну складову напруженості електричного поля

$$E_G = 10^{-3} \cdot E_B = 12 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3} = 12 \text{ В/м}$$

2. Телекомунікаційна мережа розподіляється на окремі функціональні ділянки. На кожній ділянці визначається максимальна довжина струмопровідних частин. Максимальна довжина струмопровідної частини:

1) $l_B = 0,6$ (м); $l_G = 1,3$ (м);

2) $l_B = 0,6$ (м); $l_G = 0,9$ (м);

3) $l_B = 0,8$ (м); $l_G = 0,7$ (м).

3. Визначимо напругу наведення у вертикальній (горизонтальній) струмопровідній частині:

1) $U_B = E_G l_B = 12 \cdot 0,6 = 7,2$ (В); $U_G = E_B l_G = 12 \cdot 10^3 \cdot 1,3 = 15,6 \cdot 10^3$ (В);

2) $U_B = E_G l_B = 12 \cdot 0,6 = 7,2$ (В); $U_G = E_B l_G = 12 \cdot 10^3 \cdot 0,9 = 10,8 \cdot 10^3$ (В);

3) $U_B = E_G l_B = 12 \cdot 0,8 = 9,6$ (В); $U_G = E_B l_G = 12 \cdot 10^3 \cdot 0,7 = 8,4 \cdot 10^3$ (В).

4. Визначимо допустиме коливання напруги живлення:

$$U_d = U_{жк} + (U_{жк}/100) \cdot 5 = 48 + 2,4 = 50,4 \text{ (В)}.$$

5. Визначимо коефіцієнти безпеки:

1) $K_{бв} = 20 \cdot \lg(U_d/U_B) = 20 \cdot \lg(50,4 / 7,2) = 16,9$ (дБ);

$$K_{бг} = 20 \cdot \lg(U_d/U_G) = 20 \cdot \lg(50,4 / 15,6 \cdot 10^3) = -49,8 \text{ (дБ)};$$

2) $K_{бв} = 20 \cdot \lg(U_d/U_B) = 20 \cdot \lg(50,4 / 7,2) = 16,9$ (дБ);

$$K_{бг} = 20 \cdot \lg(U_d/U_G) = 20 \cdot \lg(50,4 / 10,8 \cdot 10^3) = -46,6 \text{ (дБ)};$$

3) $K_{бв} = 20 \cdot \lg(U_d/U_B) = 20 \cdot \lg(50,4 / 9,6) = 14,4$ (дБ);

$$K_{\text{бг}} = 20 \cdot \lg(U_{\text{д}}/U_{\text{г}}) = 20 \cdot \lg(50,4 / 8,4 \cdot 10^3) = -44,4 \text{ (дБ)}.$$

Зведемо усе до таблиці 6.7.

Таблиця 6.7 – Коефіцієнти безпеки блоків телекомунікаційної радіоситеми.

Елементи радіоситеми	$I_{\text{в}}, \text{м}$	$I_{\text{г}}, \text{м}$	$U_{\text{в}}, \text{В}$	$U_{\text{г}}, \text{В}$	$K_{\text{бв}}, \text{дБ}$	$K_{\text{бг}}, \text{дБ}$	Результат дії
Блок перетворення сигналів	0,6	1,3	7,2	15600	16,9	-49,8	нестійкий
Блок формування сигналу	0,6	0,9	7,2	10800	16,9	-46,6	нестійкий
Блок обробки сигналу	0,8	0,7	9,6	8400	14,4	-44,4	нестійкий

6. Звідси можна побачити, що апаратура буде нестійка в роботі, тому що і $K_{\text{бв}}$ і $K_{\text{бг}}$ менше 40 дБ.

Заходи по підвищенню стійкості: екранування апаратури стальним,, свинцевим або алюмінієвим екраном.

6.4 Розробка заходів по підвищенню стійкості роботи телекомунікаційної радіоситеми в умовах надзвичайних ситуацій

Головне завдання захисних пристроїв від ЕМІ - виключити доступ наведених струмів до чутливих вузлів і елементів обладнання. У кожному конкретному випадку повинні бути знайдені найбільш ефективні і економічно доцільні методи захисту електронної апаратури і великих розгалужених телекомунікаційних систем. Розглянемо основні методи захисту:

1. Металеві екрани відбивають електромагнітні хвилі і гасять високочастотну енергію. Через систему заземлення струм, наведений ЕМІ, стікає в землю, не завдаючи шкоди електронної апаратури, що знаходиться усередині металевих шаф або коробів.

2. Сполучні кабелі для захисту прокладають в земляних траншеях під цементною або бетонною підлогою будівель або укладають в сталеві короби, які заземляють. Надійність підвищується, якщо кабель розгалужується і підводиться

до декількох шаф з розділовими трансформаторами. У цьому випадку ізольовані ділянки телекомунікаційної радіосистеми володіють великим опором ізоляції і малої ємністю проводів відносно землі. Також доцільно застосовувати фільтри від високочастотних перешкод.

3. Основні функції захисного розрядника - розімкнути лінію або відвести енергію для запобігання пошкодження в обладнанні. Для захисту апаратури можуть бути рекомендовані плавкі запобіжники і захисні вхідні пристосування, які являють собою різні релейні або електронні пристрої, що реагують на перевищення струму або напруги в ланцюзі.

4. Грозозахисні пристрої.

Забезпечують «стікання» великого розряду в землю без пошкодження ізоляційних елементів ліній.

5. Захист периферійних пристроїв.

Зазначені способи і засоби захисту повинні впроваджуватися в усі види електротехнічної та радіоелектронної апаратури з урахуванням характеру вражаючої дії електромагнітного імпульсу для забезпечення надійності роботи телекомунікаційної радіосистеми в умовах НС мирного і воєнного часу.

Розрахунок екранів для захисту телекомунікаційної радіосистеми від дії електромагнітного імпульсу. Перехідне гасіння енергії електричного поля екраном для сталі:

$$A=40+ K_{\text{бв}} \quad (6.3)$$

Для блоку перетворення сигналу:

$$A_1=40+49,8=99,8 \text{ (дБ);}$$

Для блоку формування сигналу:

$$A_2=40+46,6=96,6 \text{ (дБ);}$$

Для блоку обробки сигналу:

$$A_3=40+44,4=84,4 \text{ (дБ).}$$

Розрахуємо товщину захисних екранів. Для цього візьмемо найслабкішу ланку до дії ЕМП – блок перетворення сигналу:

$$t = \frac{A}{5,2 \cdot \sqrt{f}} = \frac{99,8}{5,2 \cdot \sqrt{15000}} = 0,156(\text{см}) \quad (6.4)$$

де f – найбільш характерна частота ($f=15$ кГц),

Отже, при екрануванні всіх елементів радіосистеми з використанням екрану товщиною 0,156 см телекомунікаційна мережа буде стійкою в умовах дії електромагнітного імпульсу.

Підвищення стійкості роботи телекомунікаційної радіосистеми можна досягти шляхом посилення найбільш слабких елементів і ділянок радіосистеми, а також завчасним проведенням комплексу інженерно-технічних, технологічних та організаційних заходів, які спрямовані на максимальне зниження дії вражаючих факторів.

6.5 Висновки до розділу 6

Також в даному розділі було досліджено стійкість роботи телекомунікаційної радіосистеми в умовах дії загрозливих чинників НС.

В умовах дії іонізуючого випромінювання система буде працювати стійко, так як граничне значення експозиційної дози випромінювання $D_{гр} = 100000$ Р значно більше ніж можливе значення дози $D_m = 1273,6$ Р. Отже підвищувати стійкість роботи телекомунікаційної радіосистеми до впливу іонізуючого випромінювання непотрібно.

Вплив електромагнітного імпульсу на телекомунікаційну радіосистему призводить до порушення стійкості її роботи. Застосування екранування підвищило стійкість роботи телекомунікаційної радіосистеми в умовах дії електромагнітного імпульсу.

ВИСНОВКИ

Одними з основних тенденцій розвитку сучасних телекомунікаційних систем є розширення функціоналу, ускладнення протоколів взаємодії і підвищення рівня автономності в області прийняття рішень кожним окремим вузлом. У подібних умовах важливі алгоритми, що дозволяють поліпшити системи самотестування і надавати більш точну інформацію про проблеми всередині МС. В роботі запропоновані алгоритми, засновані на комбінації різних метрик, що дозволяють ідентифікувати впливають на ТЗ спотворення на тлі шумів.

До основних результатів роботи можна віднести наступні.

1 Розроблено алгоритм детектування і компенсації спотворення сигнального сузір'я з модуляцією BPSK, що базується на результатах аналізу вектора помилок і статистичних показників системи передачі цифрової інформації. Запропонований алгоритм оцінки якості радіосигналу з модуляцією BPSK дозволяє розрізнити вплив на стійкість телекомунікаційної системи спотворення сигнального сузір'я від впливу АБГШ. Основною особливістю даного алгоритму є використання змішаної метрики оцінки якості радіосигналу, що включає в себе як елементи еталонної метрики (BER), так і нееталонної (EVM). Запропонований алгоритм працює з BPSK модуляцією, з якої не працюють найбільш поширені в даний момент алгоритми сліпий компенсації разбаланса квадратур.

2 Встановлено, що область роботи алгоритму, в якій вносяться поліпшення, обмежена зверху значенням ВСШ, рівним 11 дБ (пороговим значенням, визначеним вимогами до помилки в каналі передачі), знизу - ВСШ, рівним 6 дБ (границею роботи критерію ідентифікації сузір'я), ліворуч - граничної кривої для обраної величини кадру.

Область роботи алгоритму, в якій вносяться поліпшення, обмежена зверху значенням ВСШ, рівним 11 дБ (пороговим значенням вимоги до помилки в

каналі передачі), знизу - ВСШ, рівним 6 дБ (границя роботи критерію ідентифікації сузір'я), ліворуч - граничної кривої для обраної величини кадру.

3 Розроблено методику, яка діє на основі комплексної оцінки якості каналу передачі інформації і дозволяє визначати наявність спотворень і ідентифікувати їх тип в широкому діапазоні ВСШ із заданою вірогідністю, що дозволяє підвищити ступінь автоматизації процесу тестування телекомунікаційного обладнання. Встановлено, що ідентифікація фазового розбаланса можлива при його величині більше 10° і ВСШ більше 6 дБ. В умовах амплітудного розбаланса спостерігаються схожі результати, за винятком більш високих відносин ВСШ - близько 11-12 дБ, при малих величинах розбаланса. Дане явище пояснюється високою завадостійкістю радіосигналу з модуляцією QPSK.

Методика має високу сумісність з сучасними вимірювальними приладами, що дозволяє здійснити її впровадження у виробництво без додаткових витрат.

4 Розроблено методику, заснована на аналізі поведінки вектора помилок, що дозволяє не тільки оцінити якість випромінюваного передавачем радіосигналу, а й ідентифікувати тип спотворення, що впливає на радіосигнал з модуляцією QAM-16. Встановлено, що межа спрацьовування визначається введеним порогом роздільної здатності. При зниженні порога найбільше погіршення показників алгоритму спостерігається при ідентифікації фазового і амплітудного розбалансі. Точність ідентифікації нелінійного спотворення сигнального сузір'я і зміщення сигнального сузір'я продемонстрували меншу залежність від порога точності. Дана методика ідентифікації типу спотворення сигналу з QAM-16 забезпечує можливість розрізнити фазовий і амплітудний типи розбаланса квадратур, зміщення сигнального сузір'я і його нелінійне спотворення при їх величиною від більш ніж 5° , щодо квадратур більш 0,95, і зміщення більше 0,05 і зміщення більше 0,05 від квадратури / синфазної складової символу сузір'я з мінімальною енергією відповідно. Запропонована методика сумісна з сучасним вимірювальним телекомунікаційним обладнанням і має високий потенціал для впровадження.

5 Запропоновано методику створення моделей телекомунікаційних пристроїв в середовищі MATLAB Simulink, які максимально точно відповідають параметрам підсилювального модуля, обраного розробником, і дозволяють оцінити що вносяться нелінійні спотворення.

ФІРЕН

ТКСТБ

ВНТУ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аджемов А.С., Санников В.Г., Общая теория связи. – М.: Горячая линия – Телеком, 2018. – 624 с.
2. Боев С.Ф., Приоров А.Л., Дубов М.А., Кисельников А.Е., Красавин К.С. Анализ помехоустойчивости системы связи с QPSK-модуляцией при искажении сигнального созвездия и идентификация типа искажения // Успехи современной радиоэлектроники. 2016. № 10. С. 3-14.
3. Кисельников А.Е. Компенсация фазового разбаланса при квадратурной демодуляции сигналов с бинарной фазовой манипуляцией // ПТСПИ 2015, Матер. всерос. науч. конф. – Суздаль, 2015. С. 310-312.
4. Кисельников А.Е. Моделирование и анализ искажений квадратурных сигналов // ПТСПИ 2017, Матер. всерос. науч. конф. – Суздаль, 2017. С. 37-39.
5. Кисельников А.Е. Определение характерных типов искажений в радиочастотном тракте с помощью анализа вектора ошибок // Сб. тез. докл. 68-й всерос. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2015. С. 260.
6. Кисельников А.Е., Дубов М.А., Приоров А.Л. Разработка алгоритма детектирования и компенсации искажения сигнального созвездия ФМН-2 на основе вектора ошибок // Цифровая обработка сигналов. 2016. № 1, С. 34-39.
7. Кисельников А.Е., Дубов М.А., Тараканов А.Н. Применение вектора ошибок для анализа искажений, воздействующих на сигнал с BPSK // Междунар. конф. «Радиоэлектронные устройства и системы инфокоммуникационных технологий», посвященная дню радио, Москва, 2015. С. 75-78.
8. Кисельников А.Е., Моисеев А.С. Моделирование усилительных модулей в среде MATLAB Simulink // Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPА-2017): докл. 19-й междунар. конф. – Москва, 2017. Т. 2. С. 585-588.

9. Кисельников А.Е., Приоров А.Л., Дубов М.А., Идентификация типа искажения сигнала QAM-16 // Успехи современной радиоэлектроники. 2017. № 7. С. 23-32.

10. Kiselnikov A., Dubov M., Priorov A. Non-reference metrics and its application for distortion compensation // Proceedings of the 21th Conference of Open Innovations Association FRUCT'21 – Helsinki, Finland, 6–10 November, 2017. pp. 172-181.

11. Боев Н.М. Системы связи. Подвижные системы связи. Лекции: учебнометодическое пособие [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. – 126 с.

12. Брюханов Ю.А. Цифровые цепи и сигналы. – Ярославль: ЯрГУ, 2005. – 154 с.

13. Галкин В.А. Основы программно-конфигурируемого радио. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2013. – 372 с.

14. Дубов М.А., Приоров А.Л. Исследование эталонных и неэталонных методов оценки вероятности битовой ошибки // Проектирование и технология электронных средств. 2012. № 2. С. 19-24

15. Дубов М.А. Моделирование цифрового радиоприемного устройства МВ/ДМВ диапазона // Докл. 12-й междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (DSPA-2010). Москва, ИПУ РАН, 2010. С. 110-113.

16. Дубов М.А., Полянин Ю.В., Будников И.А., Стоянов Д.Д. Анализ бюджетных программно-аппаратных платформ для изучения принципов SDR в университетах // Докл. 13-й междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (DSPA-2011). Москва, 2011. Т. 2. С. 265-267.

17. Дубов М., Полянин Ю., Стоянов Д. Анализ возможности применения концепции SDR в средствах связи специального назначения на примере радиостанции Р-612 // Тр. II междунар. молодеж. науч.-практ. конф. «Научнопрактические исследования и проблемы современной молодежи». КазаньЕлабуга, 2010. Т. 1. С. 126-130.

18. Дубов М.А., Полянин Ю.В., Стоянов Д.Д., Брюханов Ю.А. Особенности применения технологии SDR в средствах связи специального назначения // Молодежь и наука: модернизация и инновационное развитие страны: матер. 82 междунар. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых. Пенза, 2011. Ч. 1. С. 315-317.

19. Дубов М.А., Полянин Ю.В., Стоянов Д.Д., Брюханов Ю.А. Оценка вероятности битовой ошибки приема сигналов с квадратурной модуляцией неэталонными методами // Докл. 14-й междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2012». М., 2012. Т. 1. С. 173-177.

20. Дубов М.А., Приоров А.Л. Методика неэталонной оценки отношения сигнал/шум и вероятности битовой ошибки для квадратурных сигналов // Цифровая обработка сигналов. 2012. № 4. С. 37-43.

21. Варгатюк Г.Л., Нікітович Д.В., Мельничук О.М. Коригування інформаційної ефективності телекомунікаційних радіосистем // Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2021): матеріали VIII міжнародної науково-практичної конференції, м. Вінниця, 03-05 листопада 2021 р. – Вінниця, ВНТУ, 2021. – 1-4 с.

22. Кисельников А.Е. Определение характерных типов искажений в радиочастотном тракте с помощью анализа вектора ошибок // Сб. тез. докл. 68-й всерос. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2015. С. 260.

23. Мартюшев Ю.Ю. Практика функционального цифрового моделирования в радиотехнике. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2012. 188 с.

24. Оптимальный прием сигналов на фоне помех и шумов / Под ред. докт. техн. наук, проф. Ю.И. Савватеева. – М.: Радиотехника, 2011. 424 с.

25. Grayver E. Implementing Software Defined Radio Springer 2013. 270 p.

26. Holma H., Toskala A. WCDMA HSPA evolution and LTE, John Wiley & Sons Ltd, Finland, 2010. 628 p.

27. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

28. ГН 3.3.5-8.6.6.1-2002. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу, від 27.12.2001 року №528. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.dnaop.com/html/1709>.

29. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

30. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення. – Мінбуд України. – К.: 2006

31. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

32. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>

33. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://sop.zp.ua/norm_npaop_0_00-7_15-18_01_ua.php

34. Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>

35. Про охорону праці. Закон України від 14.10.1992 № 2694-ХІІ

ФІРЕН

ТІКСТЪ

ВНТУ

ДОДАТКИ

Додаток А
(Технічне завдання)

ФІРЕН
ТКСТБ
ВНТУ

Додаток Б
(обов'язковий)

Блок-схема алгоритму визначення впливу спотворень і активації системи
компенсації

Додаток В
(обов'язковий)

Блок-схема роботи методики ідентифікації спотворення

Додаток Г
(обов'язковий)

Структурна схема системи моделювання процесу агрегації та аналізу даних

Додаток Д
(обов'язковий)

Блок-схема функціонування системи моделювання ідентифікації спотворення
радіосигналу

Додаток Е
(обов'язковий)

Блок-схема алгоритму розрахунку апроксимованої підсилювальної
характеристики

Додаток Є
(обов'язковий)

Схема моделювання спотворень

ФІРЕН

ТКСТБ

ВНТУ

Додаток Ж
(обов'язковий)

Блок-схема роботи системи ідентифікації спотворень

Додаток А
(обов'язковий)
ВНТУ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав.кафедри ТКСТБ ВНТУ,
докт. техн. наук, професор
В.М. Кичак
“ _ ” _____ 2021 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи
ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ТА ІНФОРМАЦІЙНОЇ
ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ РАДІОСИСТЕМ
08-34.МКР.007.00.000 ТЗ

Керівник роботи
к.т.н., доц. кафедри ТКСТБ ВНТУ
Васильківський М.В.

Виконавець: ст. гр. ТКС-20м
Мельничук О.М.

Вінниця-2021

1 ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Робота проводиться на підставі наказу ректора по Вінницькому національному технічному університету від “24” 09 2021 року № 277 та індивідуального завдання на магістерську кваліфікаційну роботу.

Дата початку роботи: 01.09.2021 р.

Дата закінчення: 20.12.2021 р.

2 МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР

Метою даної магістерської кваліфікаційної роботи є виявлення і ідентифікація типів спотворень радіосигналів на тлі шумів для підвищення завадостійкості телекомунікаційних систем та збільшення ефективності та інформативності вимірювальних систем передачі цифрової інформації.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

- розробка технічного завдання;
- аналіз існуючих метрик і алгоритмів оцінки якості сигналу та виявлення можливих шляхів реалізації алгоритмів ідентифікації його спотворень;
- розробка алгоритмів ідентифікації різних типів спотворень для радіосигналів з квадратурної модуляцією;
- дослідження характеристик розроблених алгоритмів за допомогою статистичного моделювання.

Об'єктом дослідження є методи виявлення та ідентифікації лінійних і нелінійних спотворень радіосигналу, в тому числі і на тлі адитивного білого гаусового шуму (АБГШ).

Предметом дослідження є алгоритми виявлення та ідентифікації спотворень радіосигналу на основі аналізу поведінки вектора помилок і статистичних параметрів, що характеризують роботу телекомунікаційної системи.

Основними завданнями роботи є:

- техніко-економічне обґрунтування доцільності даної розробки;
- параметри ефективності телекомунікаційних радіосистем;
- розробка і дослідження алгоритму ідентифікації і компенсації спотворення сузір'я радіосигналу з модуляцією BPSK;
- дослідження методики ідентифікації спотворення сузір'я радіосигналу з модуляцією QPSK;
- ідентифікація спотворення сузір'я радіосигналу з модуляцією QAM-16;
- аналіз економічної ефективності проведеної розробки;
- дослідження питань безпеки життєдіяльності.

Запропоновані алгоритм і методики дозволяють ідентифікувати тип спотворення радіосигналу в системі передачі цифрової інформації на тлі АБГШ, що дозволяє отримати більш повну інформацію при вимірюванні параметрів телекомунікаційного обладнання і застосувати найбільш ефективний алгоритм компенсації спотворення.

Зокрема, методика виявлення та ідентифікації спотворення сузір'я з BPSK модуляцією, забезпечує підвищення завадостійкості телекомунікаційної системи до 1,3 дБ в залежності від величини разбаланса квадратур. Запропонована методика ідентифікації типу спотворення сигналу з QPSK забезпечує розрізнення фазового разбаланса при його величині більше 10° і амплітудного разбаланса від 0,1 залежно від ВСШ. Запропонована методика ідентифікації типу спотворення сигналу з QAM-16 забезпечує можливість розрізнити фазовий і амплітудний типи разбаланса квадратур, зміщення сигнального сузір'я і його нелінійне спотворення при їх величині від більш ніж 5° , щодо квадратур більш 0,95 і зміщення більше 0,05 і зміщення більш 0,05 від квадратури / синфазної складової символу сузір'я з мінімальною енергією відповідно.

Ефективність розроблених алгоритмів виявлення та ідентифікації спотворень для радіосигналів з цифровими видами модуляції перевірена статистичним моделюванням з використанням сучасних програмних пакетів.

Запропоновані алгоритм і методики можуть бути використані в телекомунікаційних системах і пристроях, в тому числі і телеметричних, а також в системах автоматизації виробництва.

Розроблені програми, що дозволяють проводити аналіз і розрахунок чутливості радіоприймального тракту, а також визначати зміну чутливості при внесенні спотворень для цифрових видів модуляції.

3 ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ МКР

Робота базується на результатах звіту із переддипломної практики “Підвищення завадостійкості та інформаційної ефективності телекомунікаційних радіосистем”, який виконувався у ВНТУ у 2021/2022 н.р. Під час підготовки магістерської кваліфікаційної роботи будуть використані матеріали цього звіту.

Список використаних джерел розробки:

3.1 Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и применение / Бернард Скляр ; [пер. с англ]. – М.: Изд. Дом “Вильямс”, 2003. – 1104с.

3.2 Аджемов А.С., Санников В.Г., Общая теория связи. – М.: Горячая линия – Телеком, 2018. – 624 с.

3.3 Боев Н.М. Системы связи. Подвижные системы связи. Лекции: учебно-методическое пособие [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. – 126 с.

3.4 Брюханов Ю.А. Цифровые цепи и сигналы. – Ярославль: ЯрГУ, 2005. – 154 с.

3.5 Галкин В.А. Основы программно-конфигурируемого радио. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2013. – 372 с.

3.6 Кисельников А.Е. Определение характерных типов искажений в радиочастотном тракте с помощью анализа вектора ошибок // Сб. тез. докл. 68-й всерос. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2015. С. 260.

3.7 Мартюшев Ю.Ю. Практика функционального цифрового моделирования в радиотехнике. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2012. 188 с.

3.8 Оптимальный прием сигналов на фоне помех и шумов / Под ред. докт. техн. наук, проф. Ю.И. Савватеева. – М.: Радиотехника, 2011. 424 с.

3.9 Grayver E. Implementing Software Defined Radio Springer 2013. 270 p.

3.10 Holma H., Toskala A. WCDMA HSPA evolution and LTE, John Wiley & Sons Ltd, Finland, 2010. 628 p.

3.11 Положення про кваліфікаційні роботи на другому (магістерському) рівні вищої освіти у Вінницькому національному технічному університеті / Уклад. А. О. Семенов, Л. П. Громова, Т.В. Макарова, Сердюк О.В. – Вінниця: ВНТУ, 2021 – 60 с.

3.12 Кухарчук В.В., Ігнатенко О.Г., Обертюх Р.Р. Методичні вказівки до оформлення дипломних проектів (робіт) для студентів всіх спеціальностей.- В.: ВДТУ, 2002.

3.13 Козловський В.О. Техніко-економічні обґрунтування та економічні розрахунки в дипломних проектах та роботах. Навчальний посібник. – В.: ВДТУ, 2003.

3.14 ДСТУ 3008-2015. Інформація та документація, звіти у сфері науки і техніки.- К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016.

3.15 Разработка и оформление конструкторской документации радиоэлектронной аппаратуры. Справочник. Под ред. Э.Т.Романьчевой.- М: Радио и связь, 1989.

3.16 Бортник Г.Г., Васильківський М.В. Методичні вказівки до підготовки магістерських кваліфікаційних робіт для студентів спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка» усіх форм навчання.- Вінниця:ВНТУ, 2018.- 50 с.

4 ВИКОНАВЕЦЬ

Вінницький національний технічний університет, кафедра телекомунікаційних систем та телебачення, студент групи ТКС-20м Мельничук О.М.

5 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ МКР

Пропонується виконати дослідження спотворень радіосигналів на тлі шумів для підвищення завадостійкості телекомунікаційних систем та збільшення ефективності та інформативності вимірювальних систем передачі цифрової інформації.

Технічні вимоги, яким повинна відповідати розробка, наступні:

- коефіцієнт бітових помилок – 10^{-5} ;
- довжина кадру при визначенні вектору помилки – 1024 біта;
- кількість кадрів для агрегації статистичних даних – 1000;
- формат модуляції сигналів – QPSK/QAM-16;
- діапазон значень ВСШ для алгоритму підвищення ефективності ТКС – 0-12 дБ;
- довжина кадру – 10^7 символів;
- порогове значення фазового розбалансу - 10° ;
- порогове значення амплітудного розбалансу – 0,1;
- підвищення завадостійкості ТКС – 1,3 дБ.

При розробці телекомунікаційних систем слід максимально використовувати стандартні та уніфіковані деталі.

6 ЕТАПИ МКР І ТЕРМІНИ ЇХ ВИКОНАННЯ

№	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Очікувані результати	Звітна документація
		початок	закінчення		
1.	Розробка технічного завдання (ТЗ)	01.09.2021р.	10.09.2021р.	Розроблене ТЗ	Додаток А
2.	Параметри ефективності телекомунікаційних радіосистем	11.09.2021р.	17.09.2021р.	Проведений аналіз	Вступ. Розділ 1.
3.	Розробка і дослідження алгоритму ідентифікації і компенсації спотворення сузір'я радіосигналу з модуляцією BPSK	18.09.2021р.	01.10.2021р.	Розроблений алгоритм	Розділ 2
4.	Дослідження методики ідентифікації спотворення сузір'я радіосигналу з модуляцією QPSK	02.10.2021р.	29.10.2021р.	Розроблений метод	Розділ 3
5.	Ідентифікація спотворення сузір'я радіосигналу з модуляцією QAM-16	30.10.2021р.	19.11.2021р.	Характеристики і параметри	Розділ 4
6.	Аналіз економічної ефективності	20.11.2021р.	30.11.2021р.	Економічна частина МКР	Розділ 5
7.	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	01.12.2021р.	06.12.2021р.	Частина ОТ та БНС	Розділ 6
8.	Оформлення пояснювальної записки (ПЗ) та графічної частини	07.12.2021р.	13.12.2021р.	Оформлена документація	ПЗ та графічна частина
9.	Нормоконтроль, попередній захист, опонування МКР	14.12. 2021р.	17.12.2021р.	Позитивні відзиви	Відгуки
10.	Захист МКР ЕК		20.12.2021р.	Позитивний захист	Протокол ЕК

7 ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОРЯДОК РЕАЛІЗАЦІЇ МКР

В результаті виконання роботи будуть розроблені:

- блок-схема алгоритму визначення впливу спотворень і активації системи компенсації;
- блок-схема роботи методики ідентифікації спотворення;
- структурна схема системи моделювання процесу агрегації та аналізу даних;
- блок-схема функціонування системи моделювання ідентифікації спотворення радіосигналу;
- блок-схема алгоритму розрахунку апроксимованої підсилювальної характеристики;
- схема моделювання спотворень;
- блок-схема роботи системи ідентифікації спотворень;
- економічна частина МКР;
- розділ ОП та БНС;
- рекомендації щодо подальшого використання розробленого алгоритму.

Результати, отримані в процесі виконання даної роботи, будуть впроваджені в галузі телекомунікацій:

- Регіональний Центр експлуатації телекомунікаційної мережі України шляхом впровадження алгоритму і методики для використання в телекомунікаційних системах і пристроях, в тому числі і телеметричних, а також в системах автоматизації виробництва;

- ПАТ “Укртелеком” шляхом впровадження нових програм, що дозволяють проводити аналіз і розрахунок чутливості радіоприймального тракту, а також визначати зміну чутливості при внесенні спотворень для цифрових видів модуляції.

Очікуваний техніко-економічний ефект. Запропоновані алгоритм і методики дозволяють ідентифікувати тип спотворення радіосигналу в

системі передачі цифрової інформації на тлі АБГШ, що дозволяє отримати більш повну інформацію при вимірюванні параметрів телекомунікаційного обладнання і застосувати найбільш ефективний алгоритм компенсації спотворення. Зокрема, методика виявлення та ідентифікації спотворення сузір'я з BPSK модуляцією, забезпечує підвищення завадостійкості телекомунікаційної системи до 1,3 дБ в залежності від величини розбаланса квадратур. Запропонована методика ідентифікації типу спотворення сигналу з QPSK забезпечує розрізнення фазового розбаланса при його величині більше 10° і амплітудного розбаланса від 0,1 залежно від ВСШ. Запропонована методика ідентифікації типу спотворення сигналу з QAM-16 забезпечує можливість розрізнити фазовий і амплітудний типи розбаланса квадратур, зміщення сигнального сузір'я і його нелінійне спотворення при їх величині від більш ніж 5° , щодо квадратур більш 0,95 і зміщення більше 0,05 і зміщення більш 0,05 від квадратури / синфазної складової символу сузір'я з мінімальною енергією відповідно.

8 МАТЕРІАЛИ, ЯКІ ПОДАЮТЬ ПІСЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ РОБОТИ ТА ПІД ЧАС ЕТАПІВ

За результатами виконання МКР до ЕК подаються пояснювальна записка, графічна частина МКР, відзив і рецензія.

9 ПОРЯДОК ПРИЙМАННЯ МКР ТА ЇЇ ЕТАПІВ

Поетапно результати виконання МКР розглядаються керівником роботи та обговорюються на засіданні кафедри.

Захист магістерської кваліфікаційної роботи відбувається на відкритому засіданні ЕК.

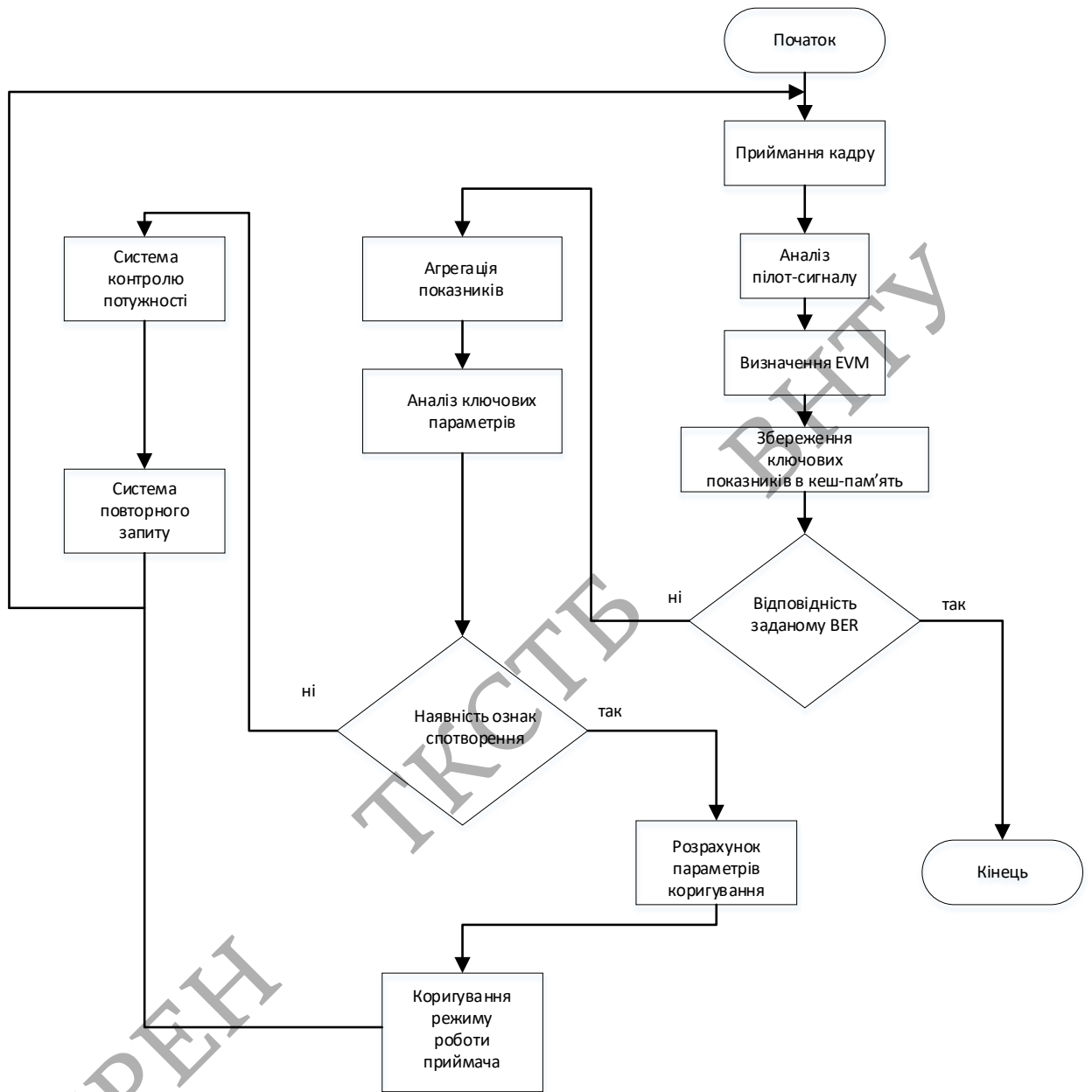
10 ВИМОГИ ДО РОЗРОБЛЮВАНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

Документація, що розробляється в процесі виконання досліджень повинна містити:

- техніко-економічне обґрунтування розробки;
- блок-схему алгоритму визначення впливу спотворень і активації системи компенсації;
- блок-схему роботи методики ідентифікації спотворення;
- структурну схему системи моделювання процесу агрегації та аналізу даних;
- блок-схему функціонування системи моделювання ідентифікації спотворення радіосигналу;
- блок-схему алгоритму розрахунку апроксимованої підсилювальної характеристики;
- схему моделювання спотворень;
- блок-схему роботи системи ідентифікації спотворень;
- економічну частину та розділ БЖД і ЦЗ;
- рекомендації щодо подальшого використання алгоритму.

11 ВИМОГИ ЩОДО ТЕХНІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ З ОБМЕЖЕНИМ ДОСТУПОМ

У зв'язку з тим, що інформація не є конфіденційною, заходи з її технічного захисту не передбачаються.



					08-34. МКР.007.00.000 Е8		
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Мельничук О.М.			Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Васильківський М.В.				1	1
Реценз.					ВНТУ, гр. ТКС-20м		
Н. Контр.		Васильківський М.В.					
Затверд.		Кичак В.М.					
					Блок-схема алгоритму визначення впливу спотворень і активації системи компенсації		

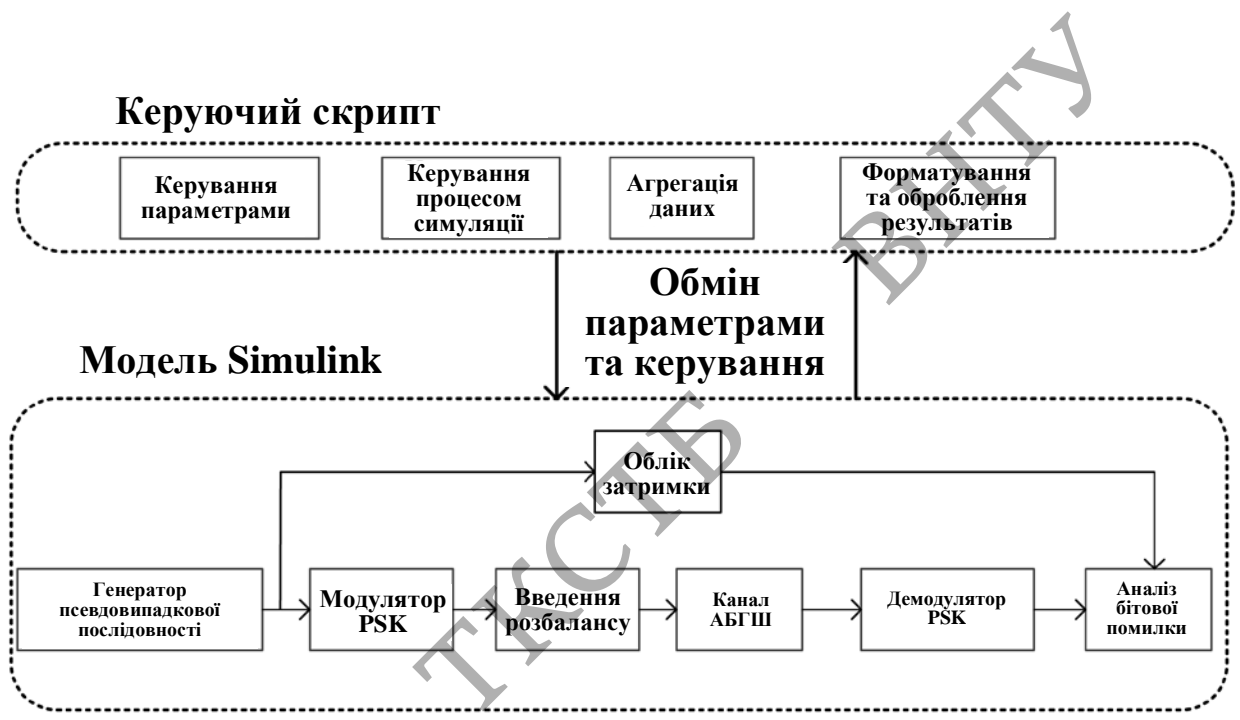


08-34. МКР.007.00.000 Е8

Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Мельничук О.М.		
Перевір.		Васильківський М.В.		
Реценз.				
Н. Контр.		Васильківський М.В.		
Затверд.		Кичак В.М.		

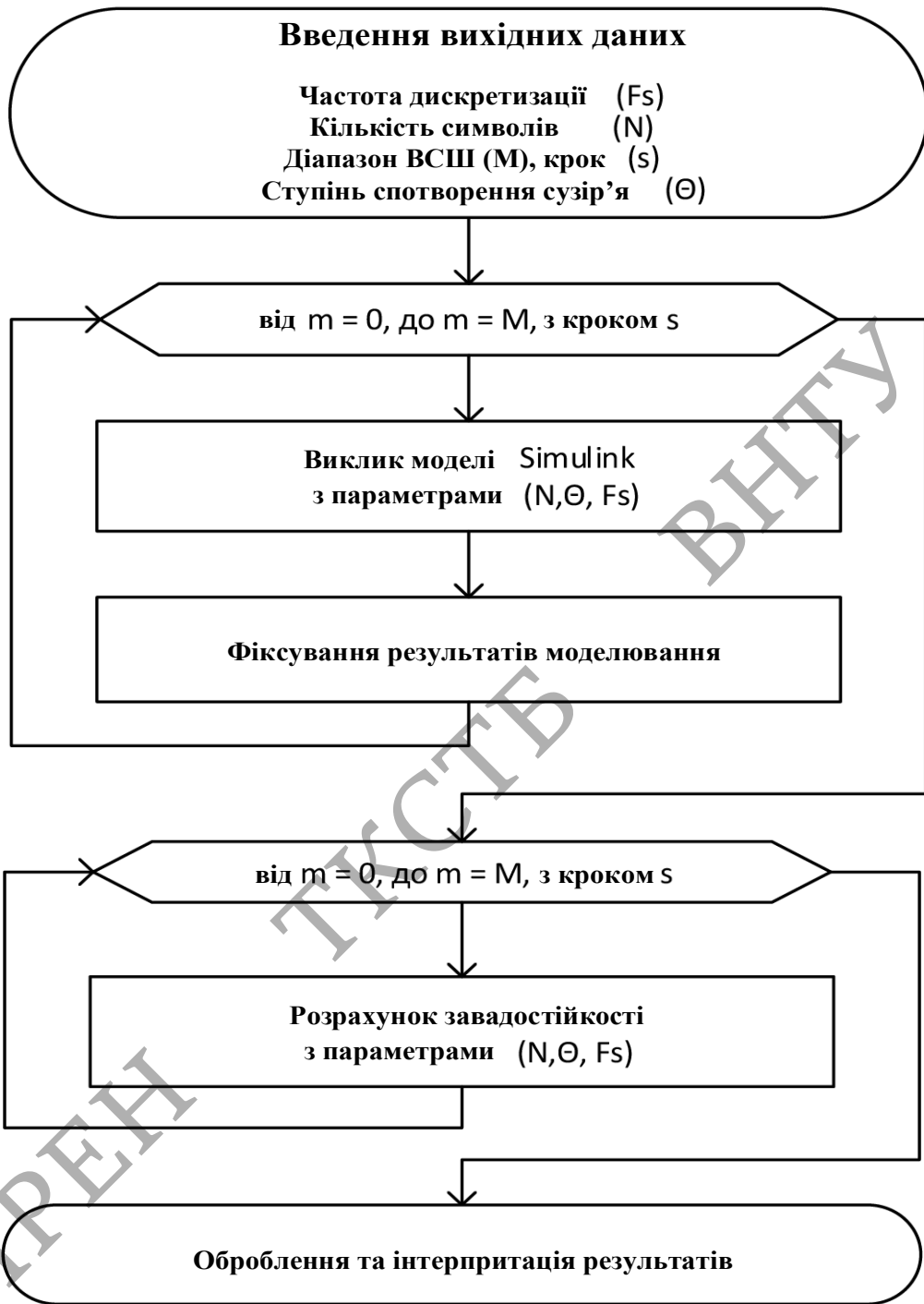
Блок-схема роботи
методики ідентифікації
спотворення

Літ.	Арк.	Аркушів
	1	1
ВНТУ, гр. ТКС-20м		

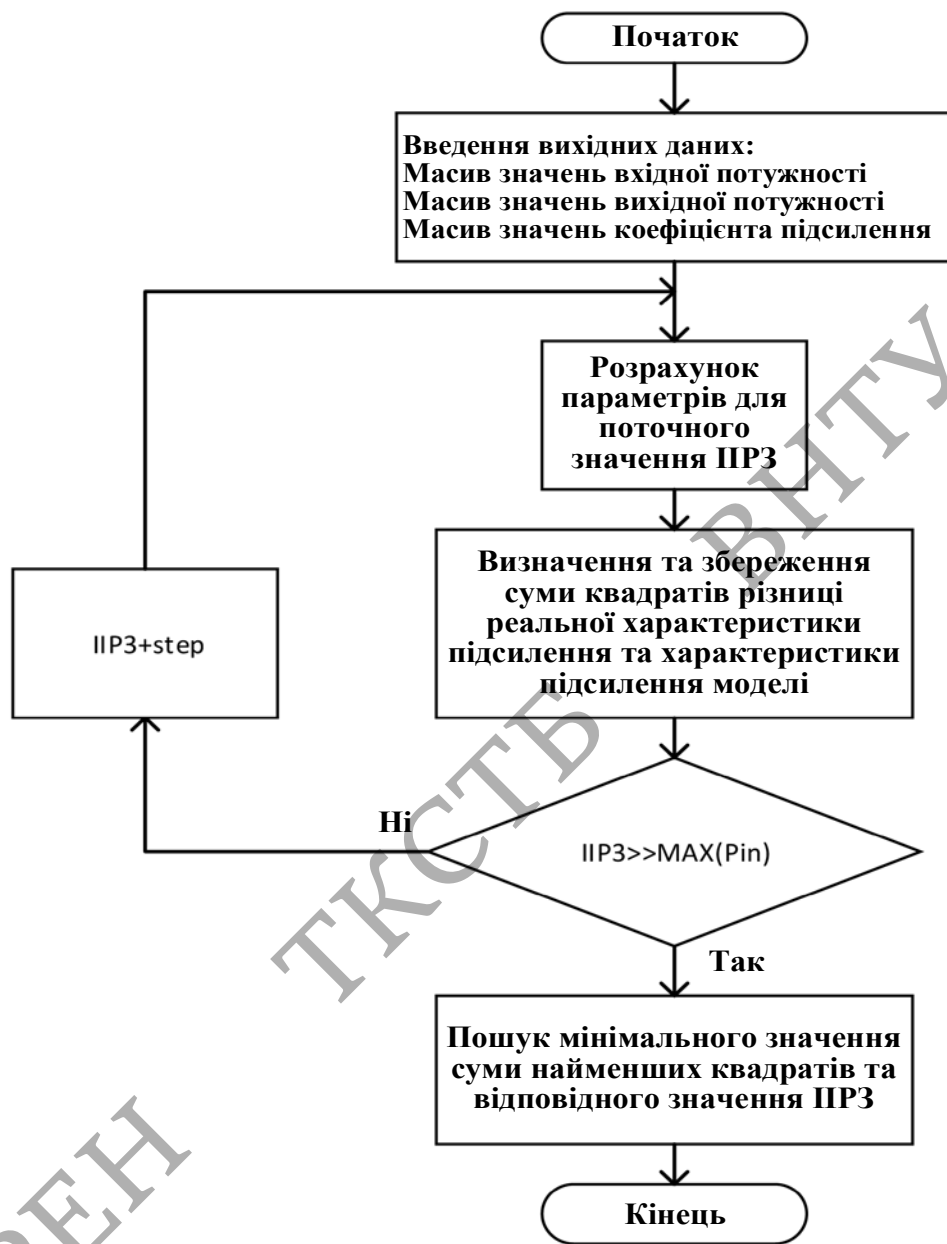


ФІРЕН

					08-34. МКР.007.00.000 Е8					
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Структурна схема системи моделювання процесу агрегації та аналізу даних			Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Мельничук О.М.							1	1
Перевір.		Васильківський М.В.						ВНТУ, гр. ТКС-20м		
Реценз.										
Н. Контр.		Васильківський М.В.								
Затверд.		Кичак В.М.								

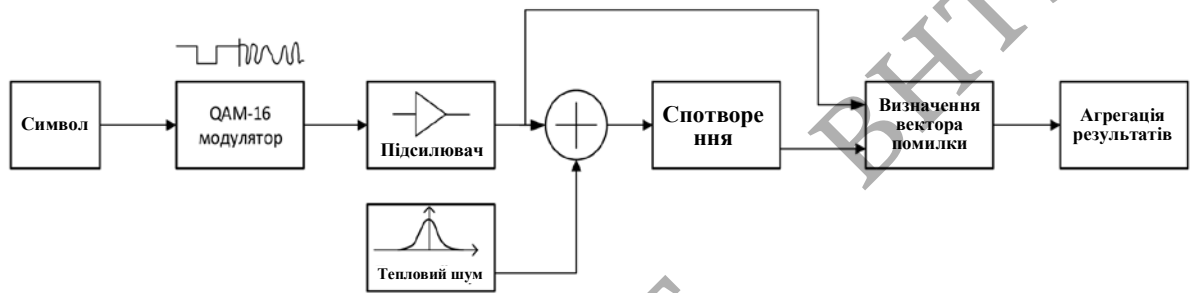


					08-34. МКР.007.00.000 Е8			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Блок-схема функціонування системи моделювання ідентифікації спотворення радіосигналу	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Мельничук О.М.					1	1
Перевір.		Васильківський М.В.				ВНТУ, гр. ТКС-20м		
Реценз.								
Н. Контр.		Васильківський М.В.						
Затверд.		Кичак В.М.						



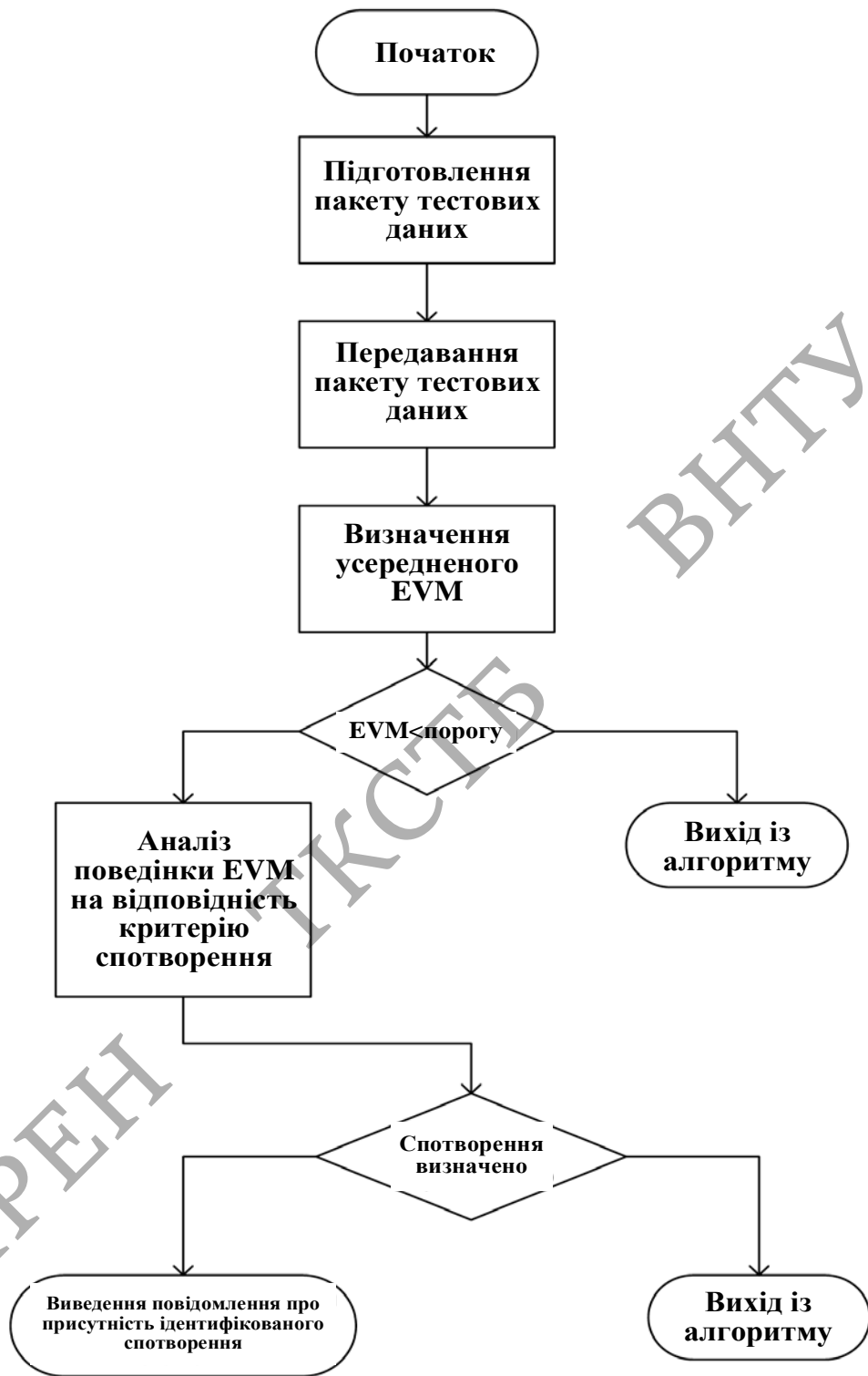
ФІРЕН

					08-34. МКР.007.00.000 Е8			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Мельничук О.М.			Блок-схема алгоритму розрахунку апроксимованої підсилювальної характеристики	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Васильківський М.В.					1	1
Реценз.						ВНТУ, гр. ТКС-20м		
Н. Контр.		Васильківський М.В.						
Затверд.		Кичак В.М.						



ФІРЕН ТКСТБ ВНТУ

					08-34. МКР.007.00.000 Е8							
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Схема моделювання спотворень			Літ.	Арк.	Аркушів		
Розроб.		Мельничук О.М.								1	1	
Перевір.		Васильківський М.В.										
Реценз.												
Н. Контр.		Васильківський М.В.						ВНТУ, гр. ТКС-20м				
Затверд.		Кичак В.М.										



					08-34. МКР.007.00.000 Е8		
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Мельничук О.М.			Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Васильківський М.В.				1	1
Реценз.					ВНТУ, гр. ТКС-20м		
Н. Контр.		Васильківський М.В.					
Затверд.		Кичак В.М.					

Блок-схема роботи системи ідентифікації спотворень