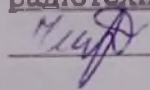


Вінницький національний технічний університет  
Факультет інформаційних електронних систем  
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

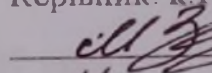
МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ МОБІЛЬНИХ  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Виконав: здобувачка 2-го курсу, групи ПЗТ-23мс  
спеціальності 172 – Електронні комунікації та  
радіотехніка



Черняк Д. О.

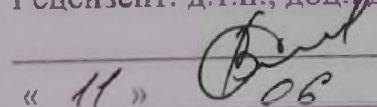
Керівник: к.т.н., доц., доцент каф. ІКСТ



Васильківський М.В.

« 11 » 06 2025 р.

Рецензент: д.т.н., доц., доцент каф. ІРТС

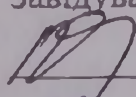


Воловик А.Ю.

« 11 » 06 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ



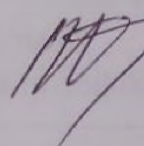
д.т.н., проф. Кичак В.М.

« 11 » 06 2025 р.

Вінницький національний технічний університет  
Факультет інформаційних електронних систем  
Кафедра інфокомунікаційних систем та технологій  
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)  
Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації  
(шифр і назва)  
Спеціальність 172 – Електронні комунікації та радіотехніка  
(шифр і назва)  
Освітня програма – Програмне забезпечення телекомунікаційних систем

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКСТ

 д.т.н., професор В.М. Кичак  
«5» 05 2025 року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧЦІ**  
Черняк Дарині Олегівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Метод підвищення завадостійкості мобільних телекомунікаційних систем

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

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

затверджені наказом ВНТУ від “20” березня 2025 року № 97

2. Строк подання здобувачем роботи: 09 червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: покращення енергетичної ефективності до 1,8 дБ; збільшення завадостійкості до 1,8 дБ; середнє зменшення обчислювальних витрат становить в 1,5 рази (еквівалентно зменшенню кількості операцій декодування на ~33%); приріст завадостійкості до 2 дБ; тип каналу: AWGN, швидкість передавання: 1 Мбіт/с; кількість реалізацій у моделюванні:  $\geq 10^6$ ; при  $\text{SNR} > 8$  дБ, ймовірність бітової помилки  $\text{BER} \leq 10^{-5}$  із використанням адаптивних алгоритмів; без адаптації при тих самих умовах  $\text{BER} \approx 10^{-4} \dots 10^{-3}$ .

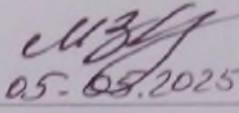
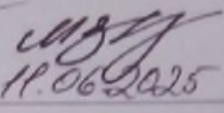
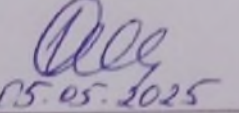
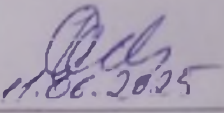
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки роботи (перелік питань, які потрібно розробити): вступ, сучасні рішення в галузі мобільних комунікацій, дослідження методів декодування та переваги перекодування, вибір ефективного алгоритму декодування з урахуванням відношення сигнал/шум, охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): будова розподіленої мережі зв'язку; система взаємодії безпілотних авіаційних платформ; структурна схема математичної моделі; схема маршрутизації



повідомлення між послідовно з'єднаними абонентами; структурна схема моделі системи з гнучким вибором алгоритмів корекції помилок; блок-схема алгоритму оцінювання співвідношення сигнал/шум.

#### 6. Консультанти розділів роботи

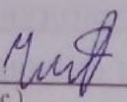
| Розділ             | Прізвище, ініціали та посада консультанта   | Підпис, дата                                                                                      |                                                                                                   |
|--------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                    |                                             | завдання видав                                                                                    | завдання прийняв                                                                                  |
| Спеціальна частина | Васильківський М.В.,<br>доцент кафедри ІКСТ | <br>05.05.2025 | <br>11.06.2025 |
| Охорона праці      | Дембіцька С.В.,<br>професор кафедри БЖДПБ   | <br>15.05.2025 | <br>11.06.2025 |

7. Дата видачі завдання «05» травня 2025 р.

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

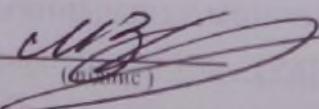
| № з/п | Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи                                                      | Строк виконання етапів роботи | Примітки |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1     | Формування та затвердження теми та індивідуального завдання бакалаврської кваліфікаційної роботи (БКР) | 06.05.2025р.                  |          |
| 2     | Виконання спеціальної частини БКР. Перший рубіжний контроль виконання БКР                              | 19.05.2025р.                  |          |
| 3     | Виконання спеціальної частини БКР. Другий рубіжний контроль виконання БКР                              | 02.06.2025р.                  |          |
| 4     | Виконання розділу «Охорона праці»                                                                      | 06.06.2025р.                  |          |
| 5     | Нормоконтроль БКР                                                                                      | 09.06.2025р.                  |          |
| 6     | Попередній захист БКР                                                                                  | 10.06.2025р.                  |          |
| 7     | Рецензування БКР                                                                                       | 11.06.2025р.                  |          |
| 8     | Захист БКР                                                                                             | 13.06.2025р.                  |          |

Здобувачка

  
(підпис)

Черняк Д.О.

Керівник роботи

  
(підпис)

Васильківський М.В.

## АНОТАЦІЯ

УДК 621.396

Черняк Д. О. Метод підвищення завадостійкості мобільних телекомунікаційних систем. Бакалаврська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – електронні комунікації та радіотехніка, освітня програма – програмне забезпечення телекомунікаційних систем. Вінниця: ВНТУ, 2025. 82 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 34 назв; рис.: 35; табл. 19.

Метою даної бакалаврської кваліфікаційної роботи є розробка підходів до підвищення завадостійкості цифрових систем зв'язку через удосконалення алгоритмів декодування з урахуванням обмежених обчислювальних ресурсів мобільних пристроїв. У ході дослідження було розроблено новий адаптивний метод, який забезпечує вибір оптимального коригувального алгоритму відповідно до поточних умов зв'язку, що сприяє досягненню необхідної якості передавання інформації.

Для реалізації поставленої мети було виконано ряд завдань. По-перше, розроблено та математично змодельовано два алгоритми декодування стирань: з адаптивним вибором та з використанням вибору та синдрому. Обидва алгоритми демонструють перевагу у завадостійкості до 1,8 дБ у порівнянні зі стандартними рішеннями. По-друге, створено алгоритм, що здійснює вибір оптимального методу декодування залежно від поточного значення співвідношення сигнал/шум, завдяки чому забезпечується необхідна якість зв'язку та зниження обчислювальних витрат у 1,5 рази. По-третє, у разі багаторазових сеансів передавання-перепередавання повідомлень реалізовано застосування повного перекодування, що забезпечує приріст завадостійкості до 2 дБ при використанні складних алгоритмів декодування. На підставі створеної математичної моделі проведено перевірку функціонування запропонованих алгоритмів, яка підтвердила їхню ефективність та обґрунтувала можливість впровадження

запропонованих рішень у сучасні цифрові системи зв'язку з обмеженими ресурсами.

Ключові слова: завадостійкість, цифрова система зв'язку, алгоритм декодування, співвідношення сигнал/шум, ретрансляція.

## ABSTRACT

UDC 621.396

Cherniak D. O. A Method for Improving the Noise Immunity of Mobile Telecommunication Systems : Bachelor's Qualification Thesis in specialty 172 – Electronic Communications and Radio Engineering, educational program – Software for Telecommunication System; Vinnytsia National Technical University. – Vinnytsia, 2025. – 82 p. : ill. 35, tabl. 19. – In Ukrainian. – Bibliogr.: 34 titles.

The aim of this bachelor's qualification thesis is to develop approaches to improving the noise immunity of digital communication systems by enhancing decoding algorithms, taking into account the limited computational resources of mobile devices. During the research, a new adaptive method was developed, which enables the selection of the optimal error-correcting algorithm depending on the current communication conditions, thus ensuring the required quality of data transmission.

To achieve this goal, several tasks were completed. First, two erasure decoding algorithms were developed and mathematically modeled: one with adaptive selection and the other using both selection and syndrome-based decoding. Both algorithms demonstrated a noise immunity gain of up to 1.8 dB compared to standard solutions. Second, an algorithm was designed to select the optimal decoding method based on the current signal-to-noise ratio (SNR) in the communication channel, resulting in the required communication quality and a 1.5-fold reduction in computational costs. Third, in scenarios involving multiple message transmission-retransmission cycles, the implementation of full re-encoding was applied, achieving up to a 2 dB improvement in noise immunity when using complex decoding algorithms.

The performance of the proposed algorithms was validated through mathematical modeling, confirming their effectiveness and justifying their potential application in modern digital communication systems with constrained resources.

Keywords: noise immunity, digital communication system, decoding algorithm, signal-to-noise ratio, retransmission.

## ЗМІСТ

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....                                                                | 7  |
| ВСТУП.....                                                                            | 8  |
| 1 СУЧАСНІ РІШЕННЯ В ГАЛУЗІ МОБІЛЬНИХ КОМУНІКАЦІЙ.....                                 | 11 |
| 1.1 Актуальні технології мобільного зв'язку .....                                     | 11 |
| 1.2 Загальні відомості про код Хемінга та алгоритми його декодування .....            | 22 |
| 1.3 Висновки до розділу 1 .....                                                       | 24 |
| 2 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ДЕКОДУВАННЯ ТА ПЕРЕВАГИ<br>ПЕРЕКОДУВАННЯ.....                   | 26 |
| 2.1 Опис математичної моделі .....                                                    | 26 |
| 2.2 Результати комп'ютерного моделювання .....                                        | 32 |
| 2.3 Ефективність перекодування .....                                                  | 35 |
| 2.4 Висновки до розділу 2 .....                                                       | 42 |
| 3 ВИБІР ЕФЕКТИВНОГО АЛГОРИТМУ ДЕКОДУВАННЯ З<br>УРАХУВАННЯМ ВІДНОШЕННЯ СИГНАЛ/ШУМ..... | 43 |
| 3.1 Система адаптивного вибору алгоритмів корекції помилок .....                      | 43 |
| 3.2 Результати комп'ютерного моделювання .....                                        | 50 |
| 3.3 Висновки до розділу 3 .....                                                       | 55 |
| 4 ОХОРОНА ПРАЦІ .....                                                                 | 56 |
| 4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....                            | 57 |
| 4.1.1 Обладнання приміщення та робочого місця .....                                   | 57 |
| 4.1.2 Електробезпека приміщення.....                                                  | 59 |
| 4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії .....                    | 61 |
| 4.2.1 Мікроклімат .....                                                               | 61 |
| 4.2.2 Склад повітря робочої зони.....                                                 | 62 |
| 4.2.3 Виробниче освітлення.....                                                       | 63 |
| 4.2.4 Виробничий шум.....                                                             | 64 |
| 4.2.5 Виробничі випромінювання.....                                                   | 65 |
| 4.3 Пожежна безпека.....                                                              | 66 |

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
|                                                            | 6  |
| 4.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі .....    | 67 |
| 4.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту..... | 67 |
| ВИСНОВКИ.....                                              | 69 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                            | 70 |
| Додаток А ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА .....                       | 74 |
| Додаток Б ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ .....  | 80 |



## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

|                      |                                                              |
|----------------------|--------------------------------------------------------------|
| АБГШ                 | — адитивний білий гаусівський шум                            |
| БС                   | — базова станція                                             |
| КПО                  | — коефіцієнт помилок оцифрування                             |
| BER (Bit Error Rate) | — ймовірність бітової помилки (частка бітових помилок)       |
| BASK                 | — двійкова амплітудна маніпуляція                            |
| BPSK                 | — двійкова фазова маніпуляція                                |
| CDMA                 | — множинний доступ з кодовим розділенням                     |
| CRC                  | — циклічна надлишкова перевірка                              |
| EVM                  | — величина вектора помилки                                   |
| EOM                  | — електронно-обчислювальна машина                            |
| FEC                  | — корекція помилок на прийомі (пряме виправлення помилок)    |
| FFT                  | — швидке перетворення Фур'є                                  |
| GF                   | — поле Галуа                                                 |
| ISI                  | — міжсимвольні спотворення                                   |
| LDPC                 | — код з малою щільністю перевірок парності                   |
| MIMO                 | — багатоканальна передача з множинним входом і виходом       |
| OFDM                 | — ортогональне частотне мультиплексування                    |
| ПК                   | — персональний комп'ютер                                     |
| QAM                  | — квадратурна амплітудна модуляція                           |
| QPSK                 | — квадратурна фазова маніпуляція                             |
| RS-код               | — код Ріда-Соломона                                          |
| SC-FDMA              | — множинний доступ з розділенням по частоті для одного носія |
| СКВ                  | — середньоквадратичне відхилення                             |
| SNR                  | — відношення сигнал/шум                                      |
| VSWR                 | — коефіцієнт стоячої хвилі напруги                           |
| FFT/IFFT             | — пряме та зворотне швидке перетворення Фур'є                |

## ВСТУП

*Актуальність теми.* Однією з ключових задач сучасних систем зв'язку є забезпечення високої швидкості передачі даних за умов збереження достатнього рівня завадостійкості. У стаціонарних системах цього можна досягти за рахунок підвищення потужності передавального обладнання. Проте в мобільних комунікаційних пристроях такий підхід часто є неприйнятним через обмеження на габарити, вагу та енергоспоживання. Збільшення потужності передавача потребує більш ємних акумуляторів, що, своєю чергою, негативно впливає на автономність пристрою. Це особливо критично для мобільних технічних систем, які виконують широкий спектр завдань, зокрема керування виконавчими механізмами або зчитування даних із сенсорів, де обмежений енергетичний ресурс повинен забезпечувати роботу всіх систем пристрою [1].

Враховуючи зазначені обмеження, особливого значення набувають програмні методи підвищення завадостійкості, зокрема застосування завадостійкого кодування. Такі методи дозволяють забезпечити надійність зв'язку без потреби у зміні апаратної частини, зокрема без збільшення потужності передавача або чутливості приймача. Суть цього підходу полягає у додаванні до інформаційного сигналу надлишкових кодів, що дозволяють виявляти та виправляти помилки, спричинені завадами. Водночас основним недоліком є підвищене навантаження на обчислювальні ресурси приймача [2].

Існує велика кількість алгоритмів завадостійкого кодування та декодування, кожен з яких має власну коригувальну здатність. Чим вища ця здатність, тим більше помилок може бути виправлено, що забезпечує стабільну роботу зв'язку навіть в умовах низької якості каналу. Однак висока коригувальна здатність безпосередньо пов'язана зі зростанням обчислювальної складності, що знову ж таки є критичним фактором для мобільних систем з обмеженими ресурсами [3].

*Аналіз останніх досліджень.* У сучасних системах мобільного зв'язку дедалі більшого значення набуває оптимізація процесів декодування інформаційних сигналів. Використання складних алгоритмів декодування, які забезпечують

високу завадостійкість, часто супроводжується значними обчислювальними витратами. Це, своєю чергою, призводить до збільшення часу обробки повідомлень і, як наслідок, до зниження ефективної швидкості передачі даних. Особливо критичною ця проблема є для мобільних пристроїв, які функціонують на базі компактних та енергозберігаючих обчислювальних блоків. Надмірне навантаження на такі блоки може суттєво вплинути на загальну продуктивність пристрою [4].

Актуальною науково-технічною задачею в контексті завадостійкого кодування є розробка декодувального алгоритму, який би поєднував високу здатність до виправлення помилок із мінімальною обчислювальною складністю. У цій роботі запропоновано підхід до створення саме такого алгоритму, що дозволяє досягти балансу між якістю зв'язку та ресурсними можливостями апаратури приймача [5].

Запропонований метод базується на використанні коду Хеммінга, що дає змогу змінити лише програмну частину приймача, залишаючи без змін кодуєчий алгоритм на передавальному боці. Це забезпечує гнучкість у впровадженні нових рішень без втручання в апаратну архітектуру передавача. Враховуючи, що не існує універсального алгоритму декодування, оптимального за всіх умов передачі, важливим аспектом стає здатність системи адаптуватися до змін у каналі зв'язку. Для цього необхідне динамічне визначення співвідношення сигнал/шум — одного з головних параметрів, що характеризує якість каналу [6].

У роботі застосовано програмний метод оцінки цього параметра, який не потребує додаткового вимірювального обладнання та може бути реалізований безпосередньо в програмному забезпеченні приймача. Окрему увагу приділено впливу просторового розміщення абонентів у мережі, зокрема в умовах, коли окремі пристрої виконують функцію ретрансляторів, що характерно для мобільних децентралізованих мереж [7].

Усі запропоновані підходи були протестовані на математичній моделі цифрової системи зв'язку, що адекватно імітує передачу сигналу через

зашумлений канал та подальшу його обробку приймальним пристроєм. Запропонований підхід до адаптивного вибору алгоритму декодування дозволяє більш раціонально використовувати обчислювальні ресурси, зберігаючи при цьому високу якість зв'язку та забезпечуючи максимальну швидкість передачі даних. Проблематика роботи полягає у подоланні суперечності між використанням алгоритмів з високою коригувальною здатністю, що вимагають значних обчислювальних ресурсів, та алгоритмів із мінімальними обчислювальними затратами, але нижчою здатністю до виправлення помилок [8].

*Мета та постановка задачі.* Метою даної бакалаврської кваліфікаційної роботи є розробка підходів до підвищення завадостійкості цифрових систем зв'язку шляхом удосконалення алгоритмів декодування з урахуванням обмежених обчислювальних ресурсів мобільних пристроїв.

Задачами бакалаврської кваліфікаційної роботи є:

1. Дослідити алгоритм декодування з вибіркоvim виправленням стираних символів на основі коду Хеммінга.
2. Дослідити метод декодування, що забезпечує гнучкий вибір алгоритмів виправлення помилок залежно від умов передачі.
3. Проаналізувати ефективність застосування різних алгоритмів завадостійкого декодування (декодування стираних символів, вибіркoве декодування, декодування із синдромом, БЧХ, алгоритм Чейза, код Хеммінга) за різних характеристик каналу зв'язку.
4. Виконати дослідження методу декодування з адаптивним вибором коригувального алгоритму.
5. Дослідити застосування розглянутих алгоритмів в умовах багатоетапної передачі повідомлень (ретрансляцій) із врахуванням дії шумових завад на сигнал.

*Апробація результатів роботи.* Основні ідеї роботи доповідались і обговорювались на науковій конференції ВНТУ у 2025 році.

# 1 СУЧАСНІ РІШЕННЯ В ГАЛУЗІ МОБІЛЬНИХ КОМУНІКАЦІЙ

## 1.1 Актуальні технології мобільного зв'язку

На сьогоднішній день цифрові системи зв'язку знаходять широке застосування в різноманітних сферах людської діяльності. У межах даного дослідження розглядається застосування цифрових систем зв'язку для побудови спеціалізованих бездротових мереж, призначених для забезпечення комунікації між мобільними абонентами. Існують різні підходи до організації систем зв'язку. Найбільш поширеною моделлю для обслуговування мобільних абонентів є використання базових станцій (БС). У контексті як глобальних (мобільні мережі), так і локальних (мережі Інтернету речей) систем зв'язку, базова станція є стаціонарним вузлом, що забезпечує покриття та управління передачею даних у межах визначеної зони [9].

Абоненти, які перебувають у зоні дії однієї БС, можуть здійснювати обмін інформацією між собою через БС або зв'язуватися з абонентами, що обслуговуються іншими базовими станціями. Крім того, БС виконує функцію шлюзу між кінцевим абонентом і центральною частиною комунікаційної системи, що є типовим для архітектур мереж Інтернету речей. Застосування базових станцій сприяє підвищенню таких показників системи зв'язку, як швидкість передавання даних і завадостійкість [10].

Попри переваги, архітектура з використанням БС має низку обмежень. Зокрема, абоненти залишаються функціонально залежними від роботи базової станції — у разі її виходу з ладу або виходу абонента за межі зони покриття втрачається можливість зв'язку з іншими учасниками мережі. Таким чином, така система є умовно стаціонарною (ефективною лише в межах дії БС), якщо не враховувати глобальні інфраструктури з множинною кількістю базових станцій, і водночас має критичну точку відмови — саму БС.

У низці випадків, коли пріоритетом є підвищена живучість системи зв'язку, встановлення стаціонарної базової станції є неможливим, або абоненти



переміщуються на відстані, що суттєво перевищують радіус дії БС. У таких умовах застосовуються спеціалізовані бездротові мережі. Відмінною рисою таких мереж є відсутність стаціонарної базової станції. Замість неї функцію керування передачею даних виконує головний вузол (мастер-пристрій), який здійснює централізоване управління інформаційним обміном у мережі [11].

У найпростішій конфігурації головний пристрій є єдиним керуючим елементом системи зв'язку, забезпечуючи контроль усіх комунікаційних потоків за принципом «точка – багатоточка» (див. рисунок 1.1) [12].

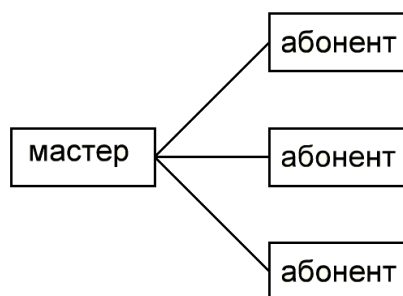


Рисунок 1.1 – Топологія мережі типу «master–slave» із широкомовним режимом передачі

Мережа з головним (керуючим) пристроєм функціонально подібна до мережі з базовою станцією, однак відрізняється лише мобільністю центрального вузла. Така архітектура характеризується підвищеною вразливістю: у разі виходу з ладу головного пристрою комунікація між абонентами стає неможливою. Крім того, втрата зв'язку з абонентом відбувається при його виході за межі зони дії головного вузла. Для розширення покриття мережі та забезпечення обслуговування більшої кількості мобільних абонентів доцільним є використання розподіленої (децентралізованої) топології мережі (див. рисунок 1.2). У розподіленій мережі головний вузол має у підпорядкуванні декілька дочірніх керуючих пристроїв (мастерів), кожен з яких забезпечує обслуговування окремої групи абонентів. Прив'язка абонентів до відповідного керуючого вузла може бути як фіксованою, так і динамічною — залежно від

якості з'єднання абонент може автоматично перемикатися до найближчого мастер-вузла, що забезпечує кращі параметри зв'язку. У такому випадку головний пристрій опрацьовує лише трафік, пов'язаний з передачею даних між абонентами, які належать до різних підмереж [13].

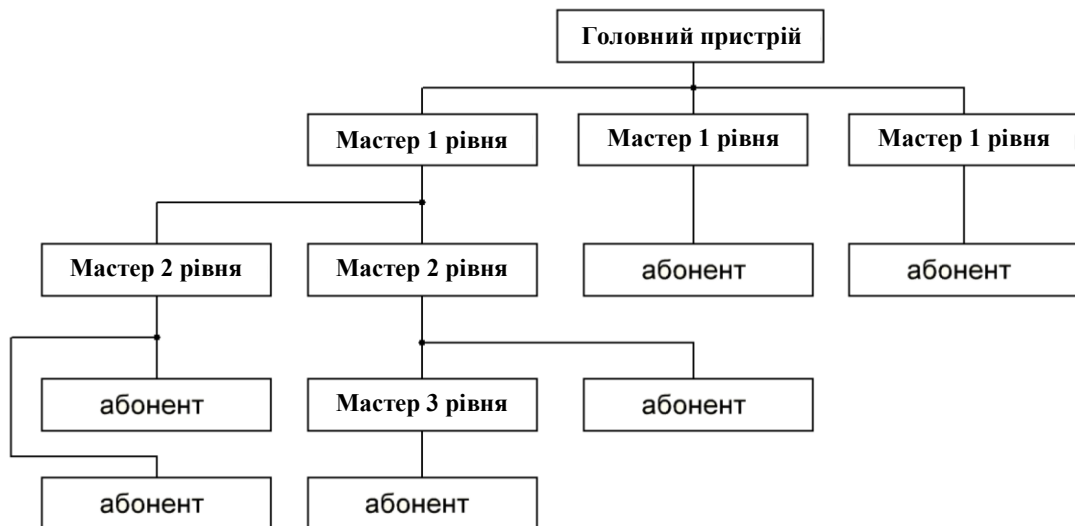


Рисунок 1.2 – Будова розподіленої мережі зв'язку

Розподілена мережа може мати багаторівневу ієрархічну структуру. Наприклад, головний вузол координує роботу декількох підлеглих керуючих вузлів, які, у свою чергу, керують власними групами майстрів нижчого рівня. Таким чином, можлива побудова мережі з кількома рівнями вкладеності. Зокрема, бездротові модулі типу NRF24 дозволяють реалізувати мережі з ієрархією до п'яти рівнів, у яких кожен мастер може мати до п'яти підлеглих вузлів, що загалом дає змогу сформувати структуру з 3125 логічно пов'язаних вузлів [14].

Вразливим елементом такої топології є окремий вузол: втрата одного з них тягне за собою втрату доступу до всіх підпорядкованих пристроїв. Чим вищим є рівень у ієрархії втраченого вузла, тим більше абонентів опиняються поза зоною покриття мережі. Для підвищення надійності функціонування системи зв'язку доцільно застосовувати архітектури, у яких передбачена можливість прямої

взаємодії між абонентами без участі базових станцій або керуючих вузлів. У таких мережах базовим механізмом обміну є зв'язок типу «точка–точка», за якого два абоненти здійснюють безпосередню комунікацію між собою. Такий принцип зменшує загальну пропускну здатність мережі, однак суттєво підвищує її живучість. У разі неможливості встановлення прямого з'єднання між двома абонентами, передача інформації здійснюється через одного або кількох проміжних абонентів-ретрансляторів. За такого підходу збереження зв'язку гарантується за умови, що кожен абонент перебуває у радіусі дії хоча б одного іншого учасника мережі [15].

Оскільки всі типи децентралізованих мереж поступаються за швидкістю передавання даних системам з базовими станціями, які, однак, не є придатними для обслуговування абонентів, що постійно переміщуються на значні відстані, у даній роботі акцент робиться на аналізі мережевої організації з позиції надійності. У подальшому розглядається система зв'язку без явно вираженого центрального вузла, в якій абоненти можуть встановлювати з'єднання один з одним безпосередньо або через проміжних абонентів.

Такі системи не належать до класу стільникових мереж і не потребують наявності ретрансляційної вежі — функцію ретранслятора може виконувати будь-який учасник мережі. Подібні архітектури зручні для використання в умовах відсутності інфраструктурного стільникового покриття [16].

Прикладами таких систем можуть бути мережі, сформовані з персональних радіостанцій на великих виробничих об'єктах або мережі безпілотних літальних апаратів (див. рисунок 1.3).

Характерною особливістю подібних систем є відсутність стаціонарних вузлів у мережі. Усі абоненти перебувають у постійному русі відносно один одного, що зумовлює динамічну зміну топології мережевих з'єднань.

У найпростішому випадку, коли кожен учасник мережі має можливість встановлювати прямий зв'язок з будь-яким іншим учасником за допомогою власних засобів радіозв'язку, конфігурація мережі набуває вигляду, зображеного на рисунку 1.4.

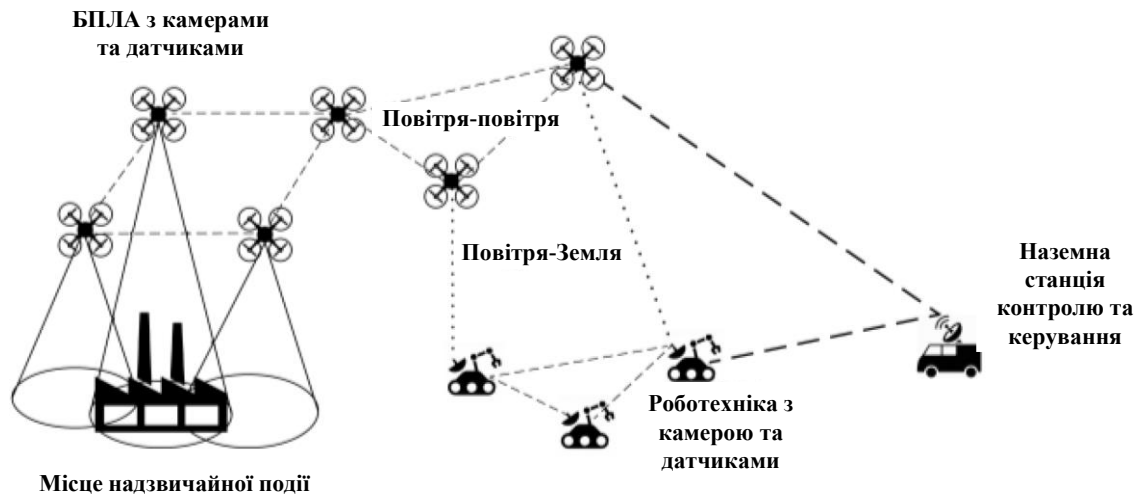


Рисунок 1.3 – Система взаємодії безпілотних авіаційних платформ

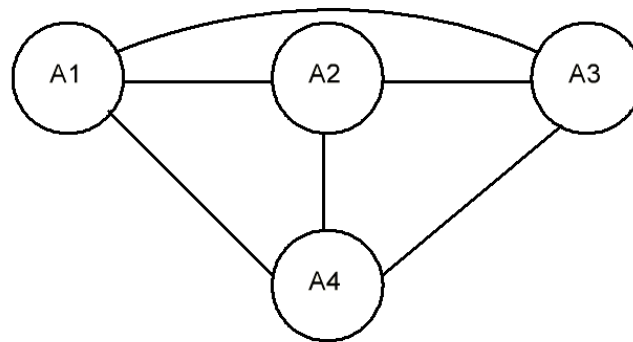


Рисунок 1.4 – Мережа з повнозв'язною топологією між абонентами

За такої топології мережі алгоритм обміну даними між абонентами є досить простим: передавальний пристрій вибирає приймальний, з яким буде здійснювати взаємодію на поточний момент, і передає йому інформацію.

Оскільки йдеться про мобільні пристрої, можливе виникнення ситуацій, коли не всі учасники мережі перебувають у межах прямої радіовидимості один одного. У таких випадках для забезпечення зв'язку між абонентами, відстань між якими перевищує ефективний радіус дії їхнього передавального обладнання, використовуються проміжні абоненти, які виконують функції ретрансляторів [17].

Приклад такої конфігурації наведено на рисунку 1.5: абонент А1 розташований поза зоною прямого зв'язку з абонентами А3 та А4. Зв'язок між ними забезпечується за допомогою другого абонента, який виконує функцію ретранслятора між А1 і абонентами А3 та А4.

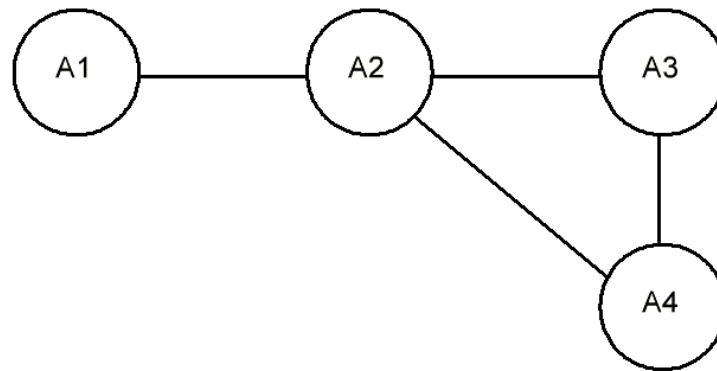


Рисунок 1.5 – Топологія мережі з ретрансляційною функцією абонента 2

За умов постійної зміни топології мережі виникає необхідність у динамічному керуванні параметрами передачі даних. Зокрема, коли всі абоненти перебувають у межах прямої видимості один одного, можливе встановлення максимально допустимої швидкості передавання. Водночас, при залученні абонента-ретранслятора, який повинен забезпечувати зв'язок із кількома абонентами майже одночасно, пропускна здатність мережі знижується. Крім того, при передаванні сигналу по радіоканалу на нього впливають завади та шуми. На окремих ділянках лінії зв'язку рівень впливу таких факторів може бути досить високим, що призводить до спотворення інформації, яка передається [18].

Функціонуючи в умовах постійно змінного зовнішнього середовища, система зв'язку повинна забезпечувати відповідність встановленим вимогам щодо якості передавання даних. До основних характеристик системи зв'язку належать робоча частота, тип модуляції, швидкість передачі, а також допустимий рівень похибки при передаванні інформації. Частота і модуляція значною мірою залежать від технічних особливостей використовуваних

пристроїв. Оскільки в межах цієї роботи розглядаються системи зв'язку мобільних пристроїв, критичне значення при виборі частотного діапазону мають масогабаритні характеристики апаратури. Для забезпечення компактності та енергоефективності мобільного обладнання зазвичай обирають діапазон надвисоких частот (3–30 ГГц), який дає змогу використовувати малі антени й передавачі з невеликою потужністю, що не вимагають значних енергетичних ресурсів.

Одним з найпоширеніших у таких системах є діапазон частот 2,4 ГГц [19]. У типових реалізаціях використовуються різні види квадратурної модуляції, зокрема BPSK, QPSK, QAM16, QAM32 тощо. У найпростішому та найрозповсюдженішому варіанті приймально-передавальний модуль являє собою окремий готовий пристрій із фіксованими параметрами частоти та модуляції. У більш складних конфігураціях можливе адаптивне налаштування типу модуляції й перебудова робочої частоти.

У рамках цієї роботи розглядається базовий варіант системи, в якій приймально-передавальний модуль працює на фіксованій частоті та з використанням одного типу модуляції.

Кожен тип модуляції має свої переваги та обмеження. Наприклад, модуляція QAM64 забезпечує вищу пропускну здатність у порівнянні з QAM16, проте є значно більш чутливою до ефекту Доплера та не може ефективно функціонувати без застосування сучасних методів синхронізації сигналу. Загалом, чим більшу кількість символів (позицій) має конкретна схема QAM, тим більшою є її вразливість до впливу аддитивного білого гаусового шуму (АБГШ) [20].

Під час проєктування системи зв'язку вибір методу модуляції здійснюється відповідно до вимог до системи та передбачуваних умов її експлуатації. Якщо ключовим критерієм є надійність зв'язку і допустиме зниження швидкості передачі даних заради підвищення стійкості, доцільно використовувати модуляцію BPSK як найменш чутливу до завад. Якщо ж передбачається функціонування системи в сприятливих умовах з низьким рівнем шуму, для досягнення вищої швидкості передачі доцільно застосовувати модуляції типу

QAM16, QAM32 тощо, які характеризуються високою пропускнуою здатністю [21].

Швидкість передачі даних у подібних системах визначається насамперед типом переданої інформації. Так, у випадку персональних радіостанцій передаються, як правило, голосові сигнали. У системах, що включають безпілотні автономні пристрої, типовим є передавання телеметричної інформації. Наприклад, середня швидкість передачі телеметричних даних, яка використовується в системах зв'язку автоматизованих мобільних платформ, становить 115200 біт/с [22].

Допустима точність передавання даних визначає максимальну допустиму частоту виникнення помилок у повідомленні, при якій система вважається працездатною. Ймовірність помилки в повідомленні, або ймовірність бітової помилки (PBER), залежить від співвідношення сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio — SNR) у каналі зв'язку. Це співвідношення є характеристикою якості каналу і розраховується за формулою 1:

$$SNR = \frac{E_b}{N_0} \cdot \frac{R}{B_T}, \quad (1.1)$$

де  $E_b$  – енергія одного інформаційного біта, Вт·с;

$N_0$  – спектральна щільність потужності шуму, Вт/Гц;

$R$  – швидкість передавання даних, біт/с;

$B_t$  – смуга пропускання каналу, Гц.

Ймовірність бітової помилки (PBER) пов'язана зі співвідношенням сигнал/шум ( $E_b/N_0$ ) через гаусову функцію помилок:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (1.2)$$



Залежно від типу використовуваної модуляції, аналітичний вираз ймовірності бітової помилки (PBER) як функції співвідношення сигнал/шум ( $E_b/N_0$ ) може мати різну форму.

Наприклад, для двофазної маніпуляції (BPSK) ця залежність описується наступною формулою:

$$P_{\text{біт}} = Q(\sqrt{2 \cdot \text{SNR}}). \quad (1.3)$$

Таким чином, можна стверджувати, що точність передавання даних є комплексною характеристикою, що визначається сукупністю параметрів приймально-передавальної апаратури, зокрема потужністю передавача, рівнем шумів у каналі зв'язку, швидкістю передавання інформації, смугою пропускання тощо.

Існує цілий ряд методів підвищення точності передавання даних, однак не всі з них можуть бути реалізовані в умовах функціонування розглянутих систем зв'язку [20]. Зокрема, найочевидніший підхід — збільшення вихідної потужності передавача — практично непридатний для мобільних комунікаційних пристроїв. Це пов'язано з тим, що передавач підвищеної потужності характеризується зростанням енергоспоживання, що, у свою чергу, призводить до скорочення автономного часу роботи пристрою або до необхідності встановлення акумуляторів більшої ємності, що збільшує масогабаритні характеристики пристрою. У контексті мобільних систем зв'язку такий підхід є технічно складним або взагалі непридатним до реалізації [21].

Другим підходом до підвищення точності передавання даних є використання методів завадостійкого кодування. У цьому випадку до основного інформаційного повідомлення додається додаткова службова інформація, яка дозволяє виявляти та, у більшості випадків, коригувати помилки в прийнятих даних [22]. Перевага цього методу полягає в тому, що точність передавання інформації зростає без зміни фізичних параметрів каналу зв'язку — виключно завдяки роботі обчислювальної частини пристрою. Крім того, програмне

забезпечення може бути адаптоване до різних алгоритмів кодування та декодування, що дає змогу забезпечити необхідну якість передавання без внесення змін до апаратної частини: достатньо перепрограмувати обчислювальний блок.

Основним недоліком цього методу є зростання навантаження на обчислювальні ресурси, що може призвести до збільшення часу обробки повідомлень і, як наслідок, до зниження ефективної швидкості передавання даних. Під час розроблення алгоритмів завадостійкого кодування й декодування важливо враховувати їхню обчислювальну складність. Обчислювальна складність — це показник, який визначає кількість машинних тактів, необхідних алгоритму для обробки заданого обсягу даних. Зазвичай, чим більшою є здатність алгоритму до виправлення помилок, тим вищим є його обчислювальне навантаження. Одним із ключових завдань при проєктуванні систем зв'язку для мобільних абонентів є підбір та реалізація таких алгоритмів кодування і декодування, які забезпечать необхідну точність за заданої швидкості передавання даних [2].

Слід зазначити, що обчислювальна складність алгоритму описує лише кількість машинних тактів, необхідних для обробки певного обсягу інформації. Для оцінки фактичного часу обробки повідомлення необхідно враховувати характеристики апаратної платформи. У розглядуваних системах зв'язку функції обчислювального модуля зазвичай виконує мікроконтролер. Як приклад, для оцінки обчислювальної складності алгоритмів кодування та декодування розглянемо один із найбільш поширених та енергоефективних мікроконтролерів — Atmega328 [4].

Тактова частота  $f_{\text{такт}}$  мікроконтролера Atmega328 становить 20 МГц [4]. Проведемо розрахунок максимальної кількості машинних тактів, доступної для забезпечення швидкості передавання даних 115200 біт/с при передачі інформації пакетами по 15 біт. На першому етапі обчислюється час, необхідний для передавання одного пакета з 15 біт за заданої швидкості. Для цього кількість бітів у пакеті ділиться на швидкість передавання даних.

$$t_{15 \text{ біт}} = \frac{15}{115200} = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$$

Поділивши отримане значення часу на період одного машинного такту (який є величиною, оберненою до тактової частоти мікроконтролера), отримаємо наступне:

$$N = \frac{t_{15 \text{ біт}}}{T_{\text{такт}}} = t_{15 \text{ біт}} \cdot f_{\text{такт}} = 1,3 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^7 = 2600.$$

Для забезпечення швидкості передавання даних 115200 біт/с у режимі безперервної передачі алгоритм декодування повинен виконуватися не більше ніж за 2600 машинних тактів. Таке обмеження є справедливим лише за умови, що тактова частота обчислювального пристрою становить 20 МГц. У разі, якщо алгоритм не вкладається у встановлений ліміт тактів, найпростішими варіантами розв'язання цієї проблеми є зниження швидкості передавання даних або використання менш ресурсоємного алгоритму декодування. Наприклад, при швидкості передавання 9600 біт/с і тактовій частоті 20 МГц на виконання алгоритму декодування може бути виділено вже 31 250 машинних тактів.

Альтернативний підхід полягає у заміні обчислювальної апаратури на продуктивнішу. Зокрема, при використанні мікроконтролера серії STM32 з тактовою частотою 72 МГц, за умов збереження швидкості передавання 115200 біт/с, на обробку одного пакета даних може бути виділено до 9360 машинних тактів.

Другий варіант є складнішим у реалізації та не завжди можливим, оскільки потребує істотних змін у схемотехнічному рішенні пристрою. Узагальнюючи викладене, можна зробити висновок, що застосування завадостійкого кодування в системах зв'язку з мобільними абонентами супроводжується не лише вимогами до забезпечення необхідної точності передавання даних, але й необхідністю мінімізації обчислювальних витрат. При виборі алгоритмів кодування та декодування доводиться робити компроміс: або використовувати складніший

алгоритм з кращими виправними властивостями, але з більшою обчислювальною складністю, або обрати простіший алгоритм, що має нижче навантаження на обчислювальну систему, але менш ефективний в умовах завад.

Чим більшу кількість помилок здатен виправити алгоритм, тим більше машинних тактів потрібно для його реалізації. У випадку, якщо мікроконтролер не встигає обробляти вхідні дані при використанні обраного алгоритму декодування, єдиним варіантом залишається зниження швидкості передавання даних.

Задача пошуку такого алгоритму декодування, що забезпечує високу виправну здатність при мінімальних обчислювальних затратах, є однією з ключових проблем сучасної радіотехніки.

У межах цієї роботи проведено дослідження нових алгоритмів декодування для коду Хеммінга, які поєднують у собі, наскільки це можливо, високу виправну здатність і низьку обчислювальну складність. Розглядається варіант системи з контролем стану каналу передавання даних і вибором оптимального алгоритму декодування відповідно до поточних умов експлуатації.

## **1.2 Загальні відомості про код Хемінга та алгоритми його декодування**

Існує велика кількість різноманітних методів кодування з підвищеною завадостійкістю.

У даній роботі розглядається один із таких методів — блочне кодування.

Блочний кодер здійснює розбиття безперервної вхідної інформаційної послідовності на блоки фіксованої довжини  $k$  символів.

Кожен із таких інформаційних блоків перетворюється (кодується) у відповідну кодову комбінацію довжиною  $n = k + r$  символів, яка включає початкові  $k$  інформаційних символів та  $r$  контрольних (перевірочних) символів [5].

Блочний кодер є пристроєм без внутрішньої пам'яті, тобто кожен сформований кодовий блок довжиною  $n$  символів залежить виключно від

відповідного інформаційного блока довжиною  $k$  символів, поданого на вхід кодера, і не залежить від попередніх або наступних блоків [6].

Основні параметри будь-якого блочного коду включають:

- 1) Довжину інформаційного блока —  $k$ ;
- 2) Довжину кодового блока —  $n$ ;
- 3) Кодову швидкість, яка визначається відношенням:

$$R = \frac{k}{n}.$$

4) Мінімальна кодова відстань ( $d$ ) — визначається як мінімальна кількість відмінних символів між будь-якими двома кодовими словами даного коду.

Блочні коди поділяються на систематичні та несистематичні.

Основна відмінність між цими двома типами полягає у структурі кодових слів та способі формування перевірочних символів. У систематичних кодах кодове слово починається з незміненої інформаційної частини довжиною ( $k$ ), за якою слідує ( $n - k$ ) перевірочних символів, сформованих як лінійні комбінації інформаційних символів. Для несистематичних кодів характерна відсутність чіткої межі між інформаційною та перевіркою частинами кодового слова.

Циклічним кодом називається лінійний блочний код, для якого циклічний зсув кодового слова (зміщення на один символ з поверненням виведеного символу на інший кінець) утворює інше допустиме кодове слово того ж коду.

Одним із прикладів блочних циклічних кодів є код Хеммінга. Кодування за допомогою коду Хеммінга може бути представлене у двох формах — матричній та поліноміальній. Поліноміальна форма ґрунтується на породжувальному поліномі — алгебраїчному виразі, що задає допустимі кодові слова та належить до поля Галуа ( $GF(2)$ ).

У контексті розгляду алгоритму Чейза слід підкреслити важливість коректного визначення ненадійних бітів. Помилкова ідентифікація таких бітів

може призвести до погіршення якості декодування — замість виправлення помилок декодоване слово може бути ще більше спотворене.

Алгоритм Хеммінга, розглянутий у підрозділі, характеризується простотою реалізації та низькими обчислювальними витратами. Водночас його здатність до виправлення помилок обмежена, особливо у порівнянні з алгоритмом Чейза.

Алгоритм Чейза, навпаки, забезпечує значно вищу завадостійкість, однак вимагає істотно більших обчислювальних ресурсів. Наприклад, для виправлення трьох помилок алгоритмом Чейза необхідно сформуванати ( $2^3 - 1 = 7$ ) альтернативних варіантів (припущень) помилкових векторів, до кожного з яких застосовується стандартний алгоритм Хеммінга. Таким чином, загальна обчислювальна складність алгоритму Чейза щонайменше в сім разів перевищує складність алгоритму Хеммінга.

За характеристиками обчислювальної складності та виправної здатності алгоритм декодування при стираннях займає проміжне положення між алгоритмами Хеммінга і Чейза. Це дозволяє припустити, що шляхом відповідної модифікації алгоритм обробки стирань може зберегти обчислювальну ефективність, наближену до алгоритму Хеммінга, водночас досягнувши завадостійкості, порівняної з алгоритмом Чейза.

### **1.3 Висновки до розділу 1**

Алгоритм Хеммінга, розглянутий у цьому розділі, є одним із найпростіших з погляду реалізації та характеризується низькими обчислювальними витратами. Водночас його здатність до корекції помилок є обмеженою, особливо у порівнянні з алгоритмом Чейза. Алгоритм Чейза, навпаки, забезпечує значно вищу коригувальну здатність, однак потребує суттєвих обчислювальних ресурсів. Наприклад, у випадку корекції трьох помилок алгоритмом Чейза необхідно сформуванати  $2^3 - 1 = 7$  гіпотетичних векторів, кожен з яких обробляється за допомогою базового алгоритму Хеммінга. Таким чином,

обчислювальні витрати алгоритму Чейза щонайменше у сім разів перевищують витрати, пов'язані з використанням алгоритму Хеммінга.

За рівнем корекції та обчислювальної складності алгоритм декодування стирань займає проміжне положення між алгоритмами Хеммінга та Чейза. Це дозволяє припустити, що за умови відповідної модифікації алгоритму стирань можна досягти компромісу, за якого рівень його обчислювальної складності залишатиметься близьким до алгоритму Хеммінга, водночас наближаючись до коригувальної здатності алгоритму Чейза.

## 2 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ДЕКОДУВАННЯ ТА ПЕРЕВАГИ ПЕРЕКОДУВАННЯ

Аналіз різноманітних підходів до декодування дозволяє виявити як сильні сторони, так і обмеження кожного з методів. У цьому контексті особливий інтерес викликає використання перекодування як додаткового етапу підвищення завадостійкості. Застосування перекодування забезпечує підвищення ймовірності правильного відновлення інформаційних даних, особливо в умовах високого рівня шуму або втрат, та може суттєво покращити загальну ефективність системи корекції помилок.

### 2.1 Опис математичної моделі

Для проведення порівняльного аналізу між існуючими алгоритмами декодування та алгоритмами, запропонованими в рамках даного дослідження, було здійснено моделювання на основі математичної моделі. Загальна структурна схема математичної моделі представлена на рисунках 2.1–2.2.

Функціонування моделі розпочинається з ініціалізації всіх змінних, функцій і констант, що використовуються в процесі моделювання. Далі виконується цикл обчислень для тринадцяти рівнів відношення сигнал/шум, значення яких рівномірно розподілені в діапазоні від 1 до 7 дБ. Залежно від поточного значення лічильника циклу вибирається відповідне значення середньоквадратичного відхилення (СКВ), яке відповідає певному рівню відношення сигнал/шум. У реалізованій моделі дисперсія ( $\sigma^2$ ) пов'язана з потужністю шуму  $N_0$  за наступною формулою:

$$\sigma^2 = \frac{N_0}{2}. \quad (2.1)$$

При цьому показник співвідношення сигналу до шуму (SNR) становить



$$SNR = \frac{E_b}{N_0}, \quad (2.2)$$

де  $E_b$  — енергія одного біта, яка в математичній моделі приймається за одиничну величину.

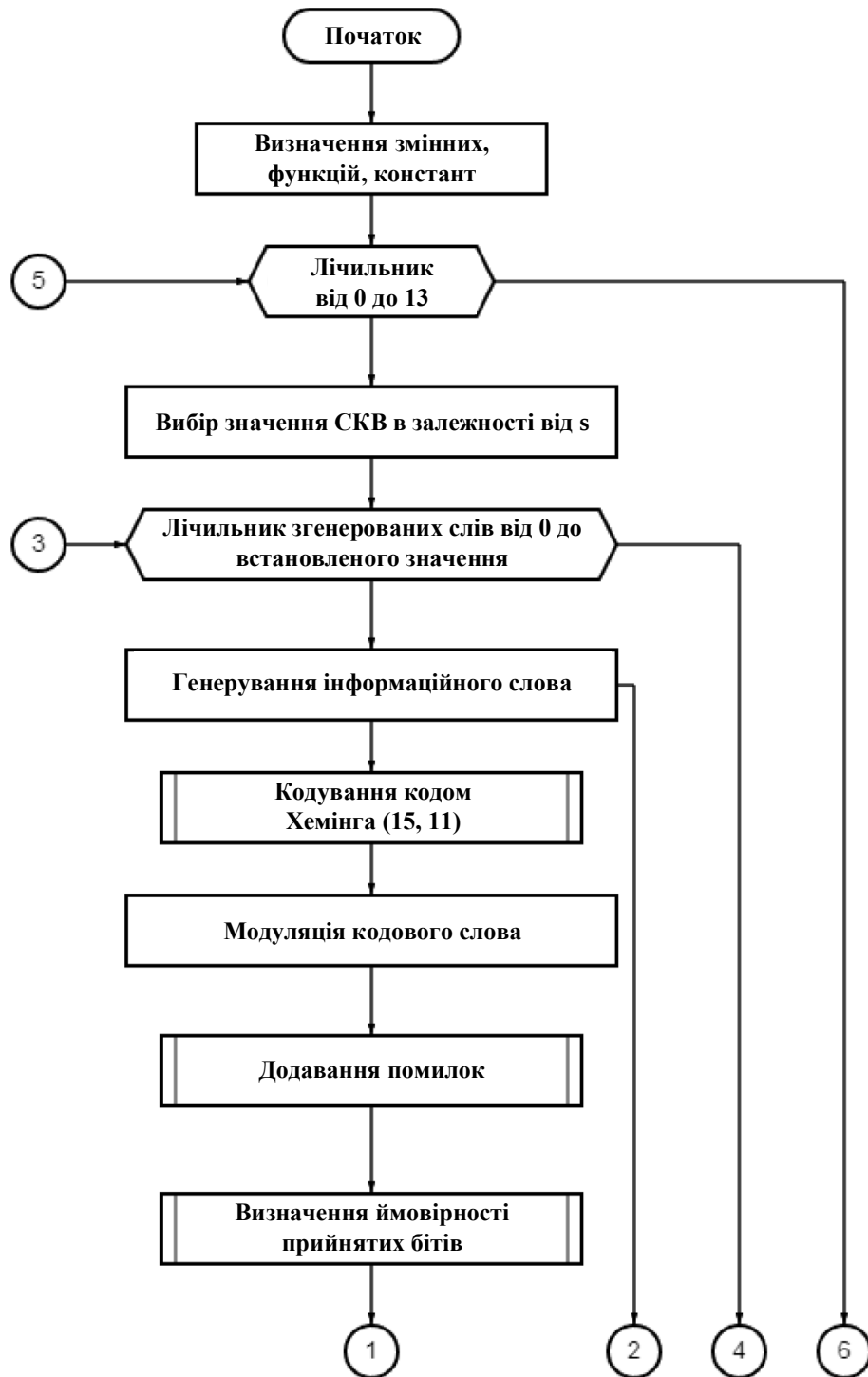


Рисунок 2.1 – Структурна схема математичної моделі (початкова частина)

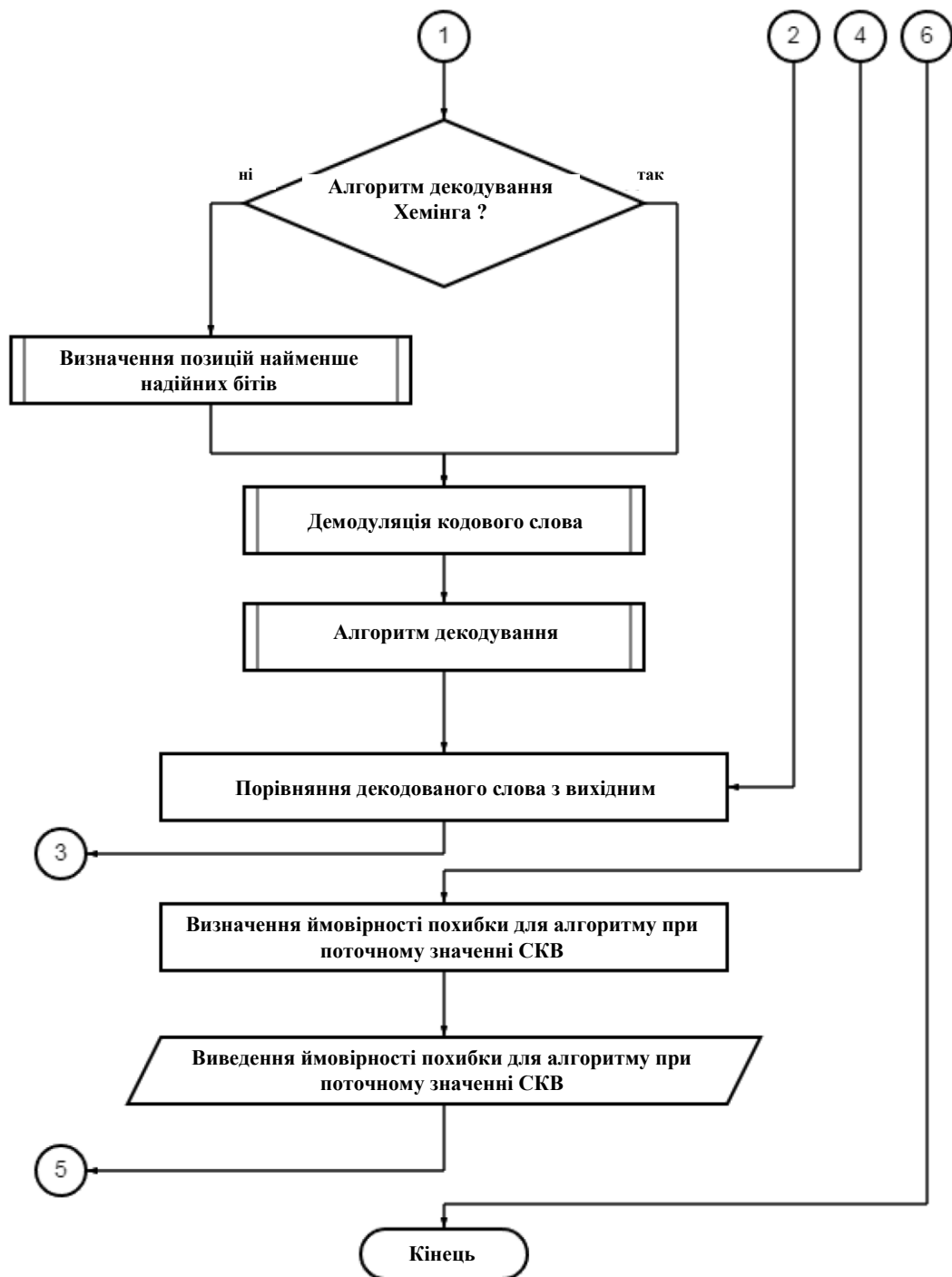


Рисунок 2.2 – Структурна схема математичної моделі (продовження)

Тоді

$$N_0 = \frac{1}{SNR} . \quad (2.3)$$

Після підстановки рівняння (2.3) у формулу (2.1) можна отримати вирази для дисперсії та середньоквадратичного відхилення (СКВ):

$$\sigma^2 = \frac{N_0}{2} = \frac{1}{2 \cdot SNR}; \quad (2.4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot SNR}}. \quad (2.5)$$

Слід зазначити, що у даному випадку SNR є відношенням сигнал/шум, вираженим у відносних одиницях. Для переведення цього значення у децибели (дБ) використовується формула [12]:

$$SNR_{db} = 10 \cdot \log_{10} SNR. \quad (2.6)$$

Після вибору поточного значення середньоквадратичного відхилення (СКВ) ініціюється цикл генерації та подальшої обробки інформаційних слів, який триває до моделювання передавання заданої кількості слів.

Цикл починається зі створення інформаційного слова довжиною 11 бітів, яке надсилається до підпрограми Хеммінгового кодування та на блок порівняння. Підпрограма виконує систематичне кодування, додаючи до інформаційного слова чотири перевіірочні біти.

Після етапу кодування слово підлягає модуляції: значення нульових бітів замінюються на  $-1$ . Модульоване кодове слово надходить до підпрограми моделювання завад, яка реалізує вплив адитивного білого гаусівського шуму (АБГШ) із заданою дисперсією на передаване слово.

Слово, зашумлене каналом, передається до підпрограми обчислення ймовірностей прийнятих бітів. У цій підпрограмі розраховується умовна ймовірність того, що прийнятий біт є одиницею або нулем. Для визначення густини умовної ймовірності застосовується теорема Байєса в контексті задач зв'язку.

$$p(s_i|z) = \frac{p(z|s_i)p(s_i)}{p(z)}, \quad i=1, \dots, M; \quad (2.7)$$

$$p(z) = \sum_{i=1}^M p(z|s_i)p(s_i), \quad (2.8)$$

де  $p(z|s_i)$  — це густина умовної ймовірності прийнятого вибіркового значення  $z$  (яке є неперервною випадковою величиною) за умови, що воно належить до класу сигналу  $s_i$ ;  $M$  — кількість можливих класів сигналів.

У даному випадку  $M = 2$ , оскільки модель передбачає передавання лише двох сигналів: одиниці та  $-1$  (що відповідає промодульованому нулю). Відповідно, густина умовної ймовірності того, що прийнятий сигнал  $z$  відповідає сигналу, еквівалентному одиниці  $s_1$ , визначається як:

$$p(s_1|z) = \frac{p(z|s_1)}{p(z|s_1) + p(z|s_0)}. \quad (2.9)$$

71

Оскільки в математичній моделі використовується адитивний білий гаусівський шум (АБГШ) із заданим середньоквадратичним відхиленням  $\sigma$  та відомою густиною ймовірності розподілу,

$$p(n_0) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{n_0^2}{\sigma^2} \right) \right]. \quad (2.10)$$

Умовні ймовірності  $p(z|s_1)$  при передаванні одиниці та  $p(z|s_0)$  при передаванні нуля мають такий вигляд:

$$p(z|s_1) = \frac{1}{\sigma_0\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{(z-1)^2}{\sigma_0^2} \right) \right], \quad (2.11)$$

$$p(z|s_0) = \frac{1}{\sigma_0\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{(z+1)^2}{\sigma_0^2} \right) \right]. \quad (2.12)$$

Тоді

$$p(s_1|z) = \frac{\frac{1}{\sigma_0\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-1}{\sigma_0^2}\right)^2\right]}{\frac{1}{\sigma_0\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-1}{\sigma_0^2}\right)^2\right] + \frac{1}{\sigma_0\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+1}{\sigma_0^2}\right)^2\right]}. \quad (2.13)$$

Ймовірність  $p(s_1|z)$  набуває значень у межах від 0 до 1. Для зручнішого декодування бажано, щоб розподіл був у діапазоні від  $-1$  до  $1$ . Цього можна легко досягти за допомогою такої трансформації:  $p(s_1|z) \cdot 2 - 1$ . Після цього прийняття рішення здійснюється за наступним правилом: якщо  $p(s_1|z) \cdot 2 - 1 < 0$ , вважається, що прийнято сигнал  $s_0$  (тобто 0); в іншому випадку — сигнал  $s_1$  (тобто 1) [10].

$$s = \begin{cases} p(s_1|z) \cdot 2 - 1 < 0, & s = 0; \\ p(s_1|z) \cdot 2 - 1 > 0, & s = 1. \end{cases} \quad (2.14)$$

Після обчислення умовних ймовірностей прийнятих бітів здійснюється ідентифікація найменш надійних бітів, тобто тих, для яких значення  $p(s_1|z)$  є найбільш близьким до нуля. Цей етап є необхідним у разі використання одного з алгоритмів стирань або алгоритмів Чейза. Якщо ж у моделі виконується перевірка працездатності алгоритму Хеммінга, то на основі розрахованих ймовірностей здійснюється демодуляція прийнятого кодового слова згідно з формулою (2.14).

Після демодуляції слово надходить до підпрограми декодування, яка реалізує один із розглянутих у роботі алгоритмів: алгоритм Хеммінга, модифіковані варіанти алгоритму Чейза (для трьох або п'яти бітів), алгоритм стирань, стирань з вибором або стирань з вибором та синдромом. Закодоване слово, що пройшло процедуру корекції помилок, звільняється від перевірочних бітів і порівнюється побітово з початковим інформаційним словом. На основі кількості розбіжностей між бітами обчислюється ймовірність бітової помилки, яка відповідає заданому рівню відношення сигнал/шум після обробки вказаної

кількості слів. Після цього здійснюється перехід до наступного рівня відношення сигнал/шум, для якого повторюються всі описані вище дії.

У якості вихідних даних програма математичної моделі виводить у консоль задане значення середньоквадратичного відхилення ( $\sigma$ ) та обчислену ймовірність бітової помилки. На рисунку 2.3 наведено приклад результатів, отриманих під час дослідження ефективності алгоритму декодування зі стираннями.

```

C:\Users\Alex\Desktop\psyp\Retrans_s_perecodom_Wybor_algorithm\main.exe
sigma=0.6
p_oshibki_after 0.0299587
sigma=0.57
p_oshibki_after 0.0215338
sigma=0.54
p_oshibki_after 0.0143901
sigma=0.51
p_oshibki_after 0.00871594
sigma=0.5
p_oshibki_after 0.00718494
sigma=0.46
p_oshibki_after 0.00277675
sigma=0.436
p_oshibki_after 0.00131292
sigma=0.42
p_oshibki_after 0.000720564
sigma=0.396
p_oshibki_after 0.000238118
sigma=0.38
p_oshibki_after 9.77909e-005
sigma=0.36
p_oshibki_after 2.40091e-005
sigma=0.335
p_oshibki_after 2.25455e-006
sigma=0.32
p_oshibki_after 4.45455e-007

Process returned 0 (0x0) execution time : 1595.835 s
Press any key to continue.

```

Рисунок 2.3 – Фрагмент реалізації програмного алгоритму

Програмне забезпечення математичної моделі було реалізовано мовою програмування C++ у середовищі розробки Code::Blocks.

## 2.2 Результати комп'ютерного моделювання

Усі досліджувані алгоритми порівнювалися за двома основними критеріями: коригувальна здатність та обчислювальна складність.

На рисунку 2.4 подано криві завадостійкості алгоритмів, які характеризують їхню здатність до виправлення помилок.

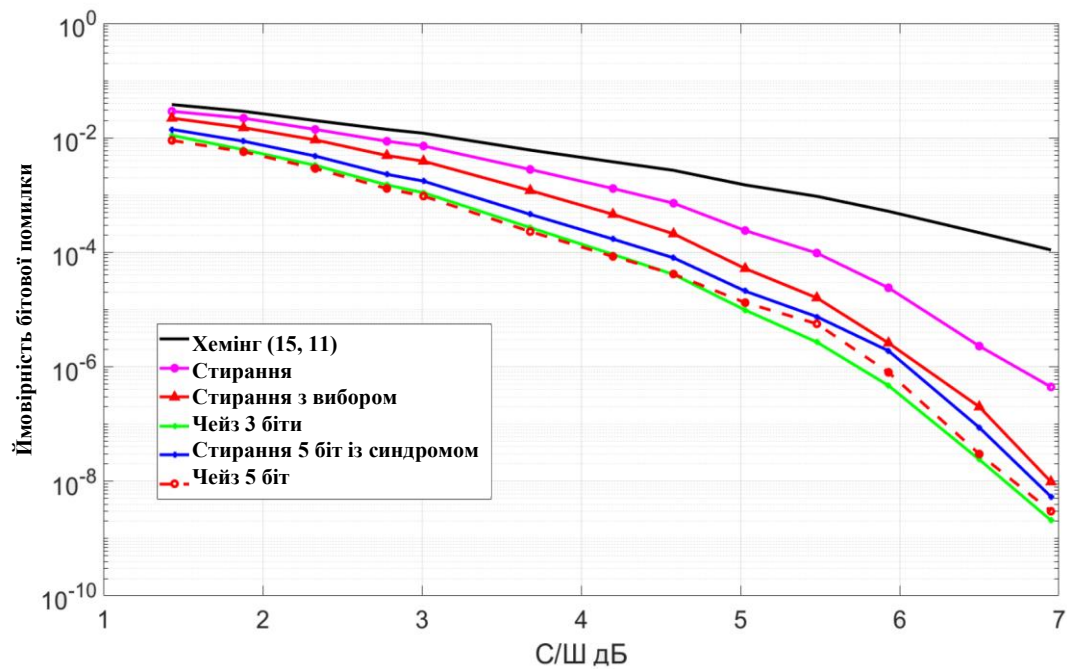


Рисунок 2.4 – Графіки залежності ймовірності бітової помилки від відношення сигнал/шум для розглянутих алгоритмів

Згідно з даними, наведеними на графіку рисунка 2.4, найвищу завадостійкість демонструє алгоритм Чейза. Цей алгоритм забезпечує ймовірність бітової помилки на рівні  $10^{-4}$  за співвідношення сигнал/шум 4,2 дБ. При цьому слід зазначити, що для коду Хеммінга (15,11) алгоритм Чейза, який коригує п'ять бітів, не має переваг перед версією, що виправляє три біти.

Другим за ефективністю відповідно до цього критерію є алгоритм декодування з використанням вибору та синдрому стирань, який досягає ймовірності бітової помилки  $10^{-4}$  за співвідношення сигнал/шум 4,6 дБ. Алгоритм декодування з використанням лише вибору стирань демонструє такий самий рівень помилки при співвідношенні сигнал/шум 4,8 дБ. Найгірші результати показують алгоритм декодування стирань без додаткових механізмів та класичний алгоритм Хеммінга — їм для досягнення ймовірності помилки  $10^{-4}$  необхідні 5,5 дБ та 7 дБ відповідно.

Другим критерієм оцінювання ефективності алгоритмів є обчислювальна складність, що визначається кількістю машинних тактів, необхідних для

виконання алгоритму. Чим більше тактів потрібно, тим більше часу витрачається на обробку одного повідомлення. На рисунку 2.5 подано діаграму, яка ілюструє кількість тактів, необхідних кожному з досліджуваних алгоритмів для обробки одного кодового слова. З метою наочності, поряд з кількістю тактів вказано час виконання, якого потребував би мікроконтролер ATmega168. Даний контролер обрано як приклад одного з типових і простих мікроконтролерів з обмеженими обчислювальними ресурсами.

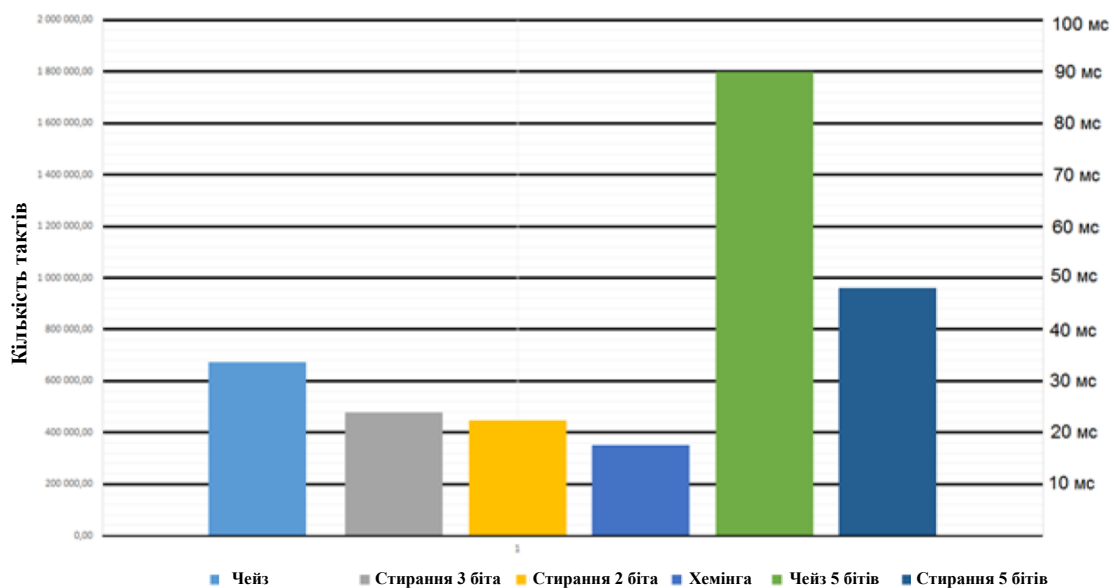


Рисунок 2.5 – Порівняння обчислювальної складності досліджених методів

Як видно з рисунка 2.5, найскладнішими з точки зору обчислювальних витрат та часових затрат є алгоритм Чейза для виправлення п'яти бітів та алгоритм декодування стирань із використанням вибору та синдрому для п'яти бітів. Підводячи проміжний підсумок, можна зробити висновок, що хоча зазначені алгоритми демонструють найвищу завадостійкість, їх реалізація потребує значної кількості обчислювальних операцій, що суттєво збільшує час обробки даних. Оскільки однією з цілей дослідження є визначення алгоритму, оптимального як за показниками завадостійкості, так і за рівнем обчислювальної складності, алгоритм Чейза для п'яти бітів та алгоритм декодування стирань з вибором і синдромом не відповідають другому критерію і в подальшому розгляді



не враховуватимуться. Узагальнюючи результати оцінювання за обома критеріями, можна стверджувати, що зі зростанням коригувальної здатності та завадостійкості алгоритму, як правило, зростає й його обчислювальна складність [3].

### 2.3 Ефективність перекодування

Оскільки досліджувані алгоритми передбачається використовувати в мобільних системах зв'язку, одним із завдань дослідження було визначення ефективності розглянутих алгоритмів при побудові системи зв'язку між ретрансляторами. Особливістю такої системи (рисунок 2.6) є те, що під час кожної ретрансляції до передаваного повідомлення можуть додаватися помилки.

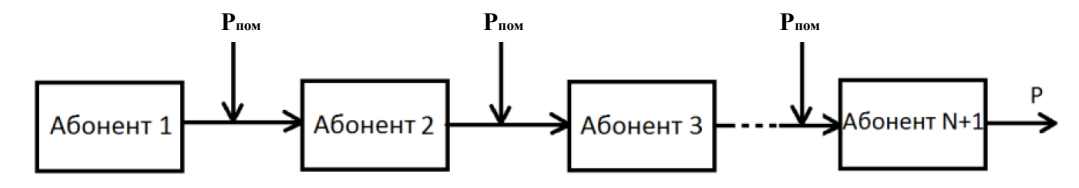


Рисунок 2.6 – Схема маршрутизації повідомлення між послідовно з'єднаними абонентами

За відсутності коригувальних алгоритмів під час кожної ретрансляції відбуватиметься накопичення помилок, що призведе до значного спотворення початкового повідомлення. Якщо припустити, що ймовірність помилки під час передачі між двома абонентами дорівнює  $P_{\text{пом}}$ , тоді після  $N$  ретрансляцій загальна ймовірність помилки визначатиметься як:

$$P = 1 - (1 - P_{\text{пом}})^N. \quad (2.15)$$

У разі використання алгоритмів виправлення помилок ймовірність помилки на виході кожного ретранслятора буде меншою за ймовірність помилки без корекції, тобто  $P_{\text{пом.випр}} < P_{\text{пом.}}$ . У такому випадку, після  $N$  ретрансляцій ймовірність помилки в повідомленні становитиме:

$$P = 1 - (1 - P_{\text{пом.випр}})^N. \quad (2.16)$$

Цей вираз показує ймовірність появи хоча б однієї помилки в повідомленні після проходження через  $N$  ретрансляторів з використанням коригувальних алгоритмів, за умови незалежності помилок на кожному етапі.

З наведених формул випливає, що при застосуванні алгоритмів виправлення помилок ймовірність помилки під час ретрансляції повідомлення зростає повільніше, ніж у разі відсутності корекції [9]. Одним із завдань дослідження було встановлення впливу не виправлених помилок на якість зв'язку під час багатократної ретрансляції повідомлень.

Було проведено дослідження ефективності алгоритмів декодування в умовах послідовної ретрансляції початкового повідомлення. У випадку появи помилки в процесі ретрансляції існує ймовірність її подальшої передачі по лінії зв'язку. У межах дослідження розглядалися особливості функціонування алгоритмів декодування за наявності подібних помилок. У результаті математичного моделювання було встановлено, що навіть одна не виправлена помилка, яка виникла в процесі ретрансляції, здатна спричинити каскадне зростання кількості помилок під час подальших ретрансляцій [9].

У таблиці 2.1 наведено приклад каскадного виникнення помилок при ретрансляції кодового слова з однією не виправленою помилкою.

Таблиця 2.1 – Приклад каскадного зростання кількості помилок під час ретрансляції без перекодування

|                       | Інформаційна частина |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Кодова частина |   |   |   |  |
|-----------------------|----------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----------------|---|---|---|--|
| Слово                 | 0                    | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |   |                |   |   |   |  |
| Кодове слово          | 0                    | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0              | 1 | 1 | 0 |  |
| Перша ретрансляція    | 1                    | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0              | 1 | 1 | 0 |  |
| Друга ретрансляція    | 1                    | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0              | 1 | 1 | 0 |  |
| Третя ретрансляція    | 1                    | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0              | 1 | 1 | 0 |  |
| Четверта ретрансляція | 1                    | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0              | 1 | 1 | 0 |  |

Таким чином, можна зробити висновок, що у разі пропуску хоча б однієї помилки алгоритмом виправлення, подальша передача повідомлення через ланцюг ретрансляторів лише погіршить ситуацію. У переважній більшості випадків, якщо коригувальні алгоритми не здатні усунути помилки в повідомленні, вони, навпаки, можуть спричиняти появу нових. Відповідно, кожен наступний ретранслятор, який застосовує такий алгоритм, додатково вноситиме нові помилки в передане повідомлення. Саме цим пояснюється різке зростання кількості помилок у випадку, коли хоча б один ретранслятор пропускає помилку без виправлення. Випадки виникнення подібних помилок можна умовно поділити на дві групи:

1. Помилки в інформаційній частині кодового слова (див. таблицю 2.1). У такому випадку не виправлена помилка буде передаватися разом із повідомленням далі по ланцюгу ретрансляторів, що спричинить подальше спотворення даних.

2. Помилки в контрольній (кодовій) частині слова. У цьому випадку кодову частину можливо відкинути без втрати корисної інформації, а інформаційну частину — повторно закодувати. Таким чином, за умови використання

коригувального алгоритму під час ретрансляції та виконання повного перекодування повідомлення (тобто відкидання старої кодової частини і формування нової), можна усунути не виправлені помилки, що потрапили в кодову частину повідомлення. У таблицях 2.2 та 2.3 наведено відповідно приклади ретрансляції повідомлення без використання повного перекодування та з його застосуванням.

Таблиця 2.2 – Процес передачі повідомлення без переформування кодової частини

|                       | Інформаційна частина |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Кодова частина |   |   |   |   |
|-----------------------|----------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----------------|---|---|---|---|
| Слово                 | 1                    | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |                |   |   |   |   |
| Кодово слово          | 1                    | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1              | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Перша ретрансляція    | 1                    | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1              | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Друга ретрансляція    | 1                    | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0              | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Третя ретрансляція    | 1                    | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0              | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Четверта ретрансляція | 1                    | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0              | 1 | 1 | 0 | 0 |

Як видно з таблиці 2.3, використання перекодування дає змогу усунути не виправлені помилки, що потрапили до кодової частини повідомлення. Помилка, яка не була виправлена під час першої ретрансляції, була відкинута разом із усією кодовою частиною, після чого повідомлення було повторно закодоване й передане далі вже без помилок. У разі відсутності перекодування в аналогічній ситуації одна не виправлена помилка, що виникла під час першої ретрансляції, спричинила б появу ще однієї помилки під час другої ретрансляції та третьої — під час подальшої передачі (див. таблицю 2.2). У ході дослідження було встановлено, що ефективність перекодування з точки зору покращення

завадостійкості суттєво залежить від типу використаного алгоритму декодування.

Таблиця 2.3 – Зменшення помилок при ретрансляції з використанням перекодування

|                       | Інформаційна частина |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Кодова частина |   |   |   |   |
|-----------------------|----------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----------------|---|---|---|---|
| Слово                 | 1                    | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |                |   |   |   |   |
| Кодове слово          | 1                    | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1              | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Перша ретрансляція    | 1                    | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1              | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Друга ретрансляція    | 1                    | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1              | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Третя ретрансляція    | 1                    | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1              | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Четверта ретрансляція | 1                    | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1              | 0 | 1 | 0 | 0 |

На рисунку 2.7 подано криві завадостійкості, отримані в результаті моделювання чотириразової ретрансляції повідомлення із застосуванням алгоритмів декодування Хеммінга та алгоритму стирань — як у поєднанні з перекодуванням, так і без нього. З графіка видно, що для алгоритму Хеммінга перекодування практично не забезпечує покращення завадостійкості. Натомість алгоритм декодування стирань демонструє незначне покращення характеристик: при ймовірності бітової помилки  $10^{-3}$  вираш за рахунок перекодування становить приблизно 0,1 дБ.

Подібна обмежена ефективність перекодування у випадку цих алгоритмів пояснюється тим, що і алгоритм Хеммінга, і алгоритм стирань реалізують жорстке виправлення помилок або відновлення стертих бітів. Якщо кількість помилок у прийнятому повідомленні перевищує одну, алгоритм Хеммінга може додати нові помилки, які з великою ймовірністю потрапляють до інформаційної частини та не можуть бути усунені шляхом перекодування.

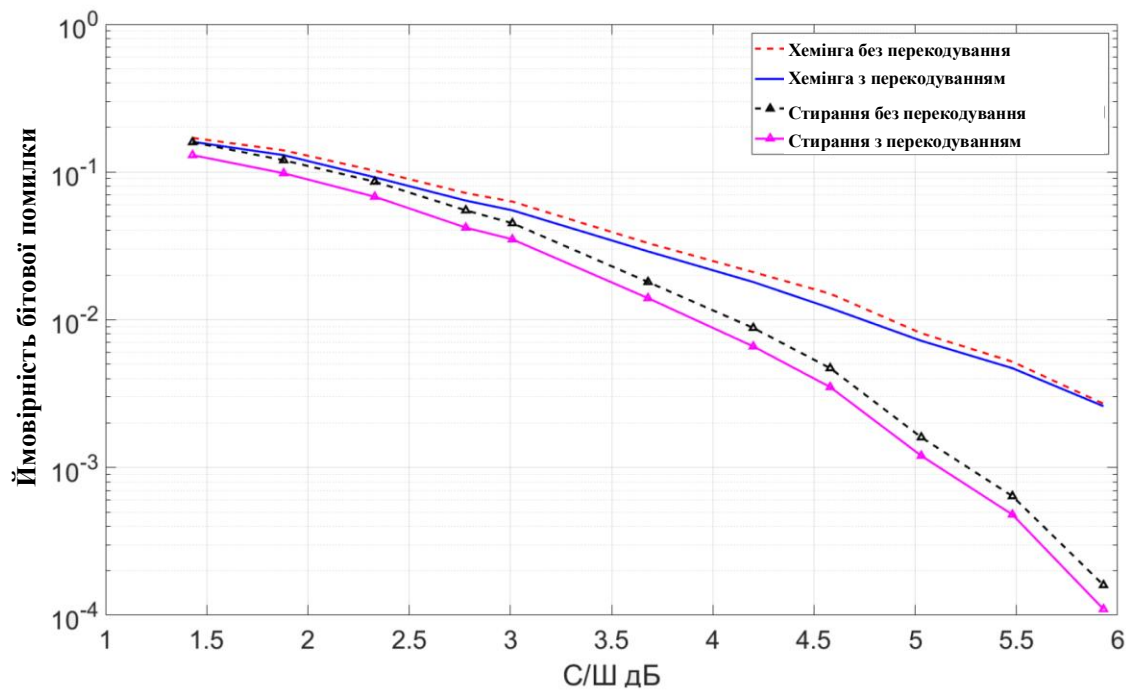


Рисунок 2.7 – Залежність завадостійкості від застосування перекодування для алгоритмів Хемінга і стирня

Алгоритм декодування стирня у випадку помилкового відновлення двох стертих бітів також може призвести до внесення нових помилок у повідомлення. Частина цих помилок, аналогічно до випадку з кодом Хеммінга, потрапляє до інформаційної частини кодового слова і не може бути усунена шляхом перекодування [9]. На рисунку 2.8 наведено криві завадостійкості для алгоритму декодування стирня з вибором та алгоритму Чейза з можливістю виправлення трьох бітів, отримані в результаті моделювання процесу чотириразової ретрансляції повідомлення із застосуванням перекодування та без нього. Із графічних даних видно, що для алгоритму декодування стирня з вибором використання перекодування забезпечує вииграш у завадостійкості на рівні 0,4 дБ при ймовірності бітової помилки  $10^{-4}$ . Алгоритм Чейза, навпаки, демонструє нижчу ефективність у разі ретрансляції без перекодування — його завадостійкість виявляється гіршою, ніж у алгоритму стирня з вибором. Таким чином, алгоритм Чейза доцільно застосовувати лише в поєднанні з перекодуванням.

Подібна поведінка алгоритмів стирань з вибором та Чейза при використанні перекодування пояснюється особливістю їхньої роботи. Ці алгоритми не обмежуються єдиним варіантом декодування, а розглядають множину можливих кодових слів. Під час вибору одного з них — того, яке найбільш подібне до прийнятого вектора, — існує ймовірність того, що обраний варіант міститиме помилки в кодовій частині повідомлення. Такі помилки, у разі відсутності перекодування, не будуть виявлені й усунені, що призведе до їх подальшого накопичення під час наступних ретрансляцій.

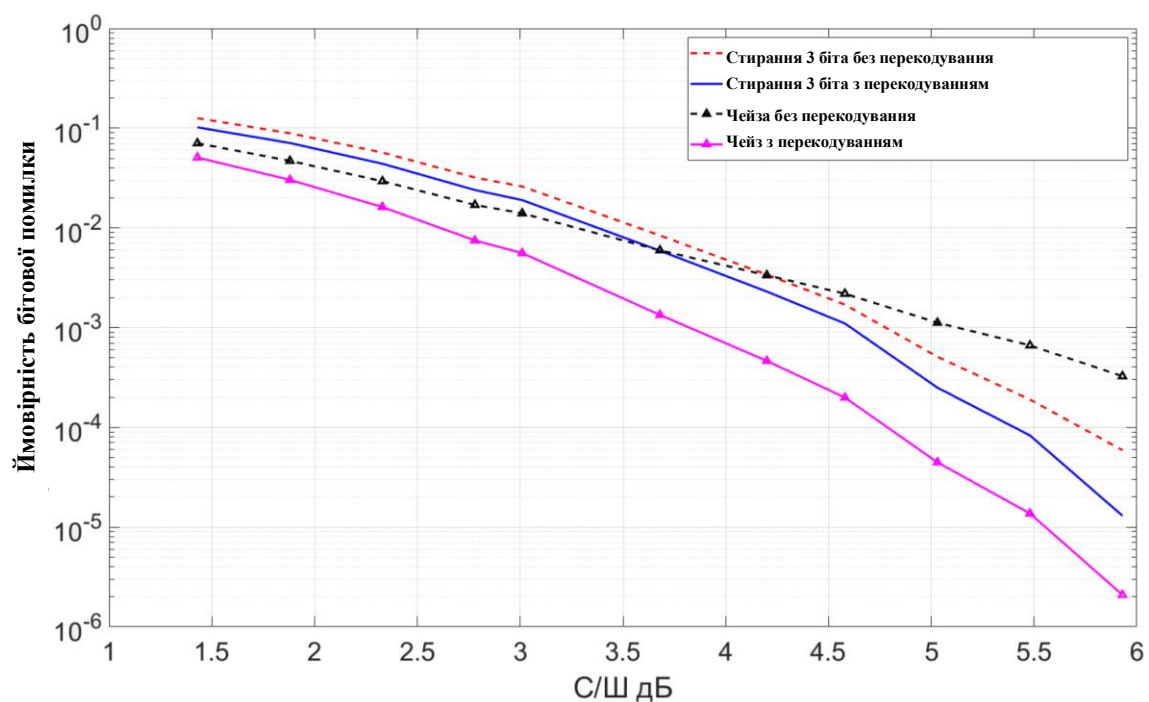


Рисунок 2.8 – Порівняння ефективності перекодування для алгоритмів Чейза і декодування стирань з вибором

У такому випадку, під час перекодування, помилкові біти будуть відкинуті разом із усією кодовою частиною повідомлення, що дозволить отримати вихідне правильне інформаційне слово, придатне для повторного кодування та подальшої передачі.

## 2.4 Висновки до розділу 2

Узагальнюючи результати проведеного дослідження, можна сформулювати такі висновки:

1. Найвищу завадостійкість демонструють алгоритми, які потребують значних обчислювальних ресурсів. Зокрема, алгоритм декодування стирань з вибором забезпечує вигаш у 2,8 дБ порівняно з алгоритмом Хеммінга при ймовірності бітової помилки  $10^{-4}$ . Загалом, чим більшу кількість помилок здатен виправити алгоритм, тим вищою є його обчислювальна складність, що призводить до збільшення часу обробки даних. Наприклад, алгоритм стирань з вибором і синдромом витрачає утричі більше часу на обробку одного повідомлення порівняно з алгоритмом Хеммінга. При виборі оптимального алгоритму декодування необхідно враховувати рівень шумів у системі зв'язку та обирати найменш ресурсоємний з тих алгоритмів, які забезпечують необхідну якість зв'язку.

2. Під час передавання повідомлень через ланцюг ретрансляторів необхідно використовувати повне перекодування, що дозволяє усувати помилки, які не були виправлені коригувальними алгоритмами. Найбільшу ефективність перекодування демонструє у поєднанні з алгоритмами, які реалізують декодування за принципом «м'якого» рішення — тобто передбачають вибір найбільш ймовірного повідомлення серед кількох можливих варіантів.



## **З ВИБІР ЕФЕКТИВНОГО АЛГОРИТМУ ДЕКОДУВАННЯ З УРАХУВАННЯМ ВІДНОШЕННЯ СИГНАЛ/ШУМ**

### **3.1 Система адаптивного вибору алгоритмів корекції помилок**

Усі розглянуті вище алгоритми мають спільну властивість: чим більше помилок здатен виправити алгоритм, тим більших обчислювальних витрат він вимагає для обробки повідомлення. Відповідно, у випадку каналу зв'язку з динамічними параметрами передачі даних не існує універсального оптимального алгоритму корекції помилок. За умов високого відношення сигнал/шум оптимальним вважається найшвидший алгоритм, здатний виправляти окремі одиничні помилки, оскільки у цьому випадку час обробки повідомлень є мінімальним. Із погіршенням якості зв'язку доцільніше використовувати алгоритми з більшою коригувальною здатністю, що, однак, потребує збільшення обчислювальних ресурсів і часу на обробку.

З метою забезпечення необхідної завадостійкості та раціонального використання обчислювальних ресурсів приймального обладнання доцільним є впровадження системи зв'язку з гнучким вибором алгоритмів корекції помилок. У такій системі, окрім передавання основних даних, має здійснюватися моніторинг поточного рівня відношення сигнал/шум у каналі зв'язку [40]. Реалізувати такий контроль можливо шляхом динамічної оцінки якості цифрового каналу передачі [19].

Структурна схема моделі системи зв'язку з гнучким вибором коригувальних алгоритмів наведена на рисунку 3.1. Розглянемо докладніше функціонування кожного з її блоків.

Джерело інформаційних повідомлень генерує вихідні дані для подальшого кодування кодом Хеммінга та статистичної обробки.

Кодер Хеммінга здійснює кодування вхідних даних, додаючи до інформаційних бітів перевіркові біти, необхідні для виявлення та виправлення помилок.

Генератор М-последовательности, параллельно з процесом кодування повідомлень, генерує М-последовательність із розрядністю  $m = 15$  та періодом  $N = 2^m - 1 = 32767$  бітів.

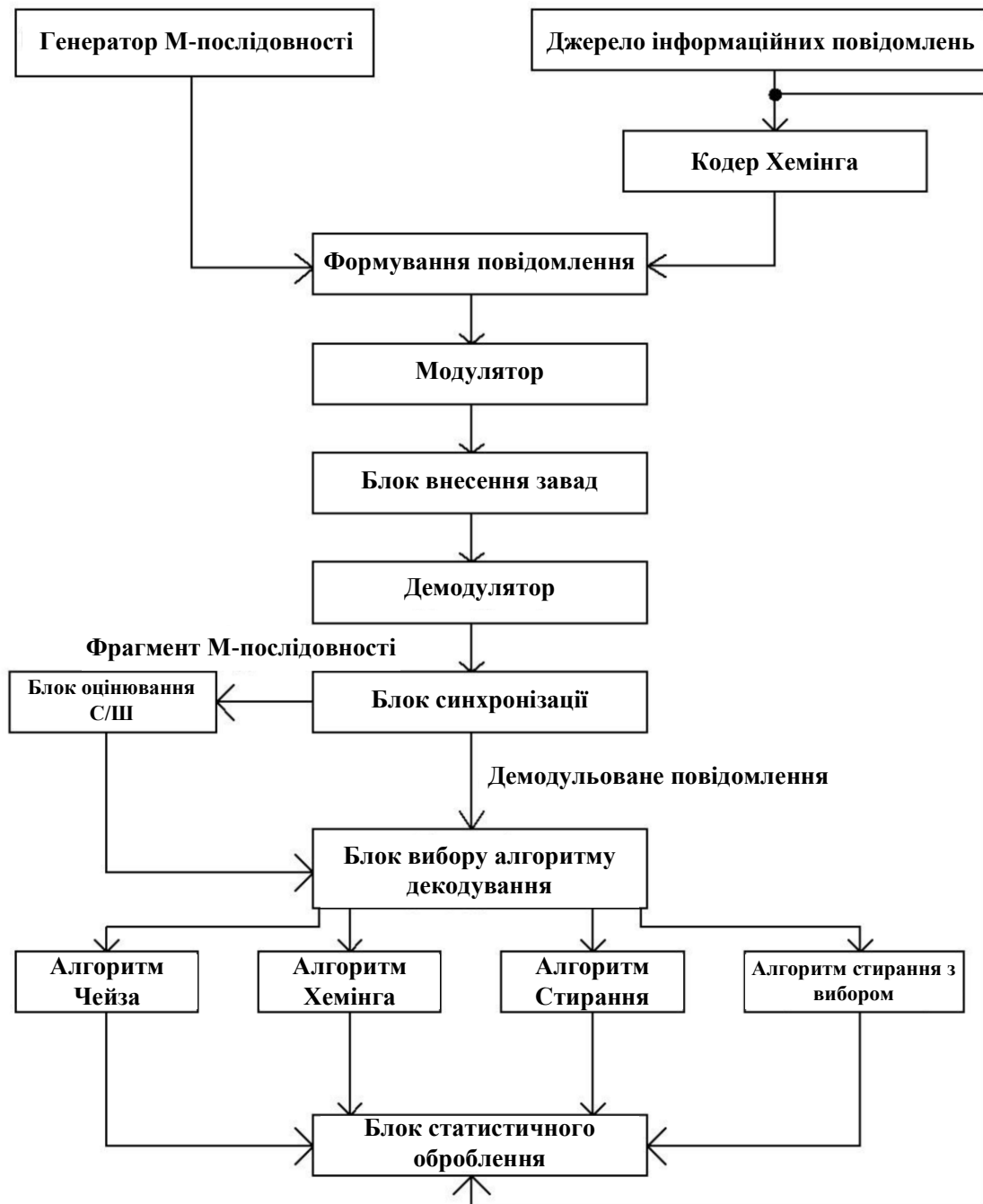


Рисунок 3.1 – Структурна схема моделі системи з гнучким вибором алгоритмів корекції помилок

Блок формування повідомлень об'єднує в єдиний кадр кодові слова, що містять корисну інформацію, а також фрагменти М-послідовності, які необхідні для синхронізації прийому даних і оцінювання рівня шуму в каналі передачі. Структура одного кадру зображена на рисунку 3.2. До складу кадру входить фрагмент М-послідовності та інформаційна частина, що складається з одного або кількох кодових слів. Довжина фрагмента та кількість кодових слів у кадрі визначаються залежно від заданої швидкості передавання даних та рівня завад у каналі.

Модулятор у межах моделі здійснює перетворення: усі біти зі значенням «0» у сформованому кадрі замінюються на значення «-1».

Блок внесення завад додає до переданого кадру спотворення, які імітують вплив адитивного білого гаусового шуму.

Демодулятор здійснює перетворення бітів кадру, що зазнав впливу шуму, у послідовність нулів та одиниць.\*\* У найпростішому випадку це перетворення виконується шляхом порівняння рівня сигналу кожного біта із нульовим порогом. Якщо значення сигналу менше нуля, прийнятий біт інтерпретується як нуль; у протилежному випадку — як одиниця.

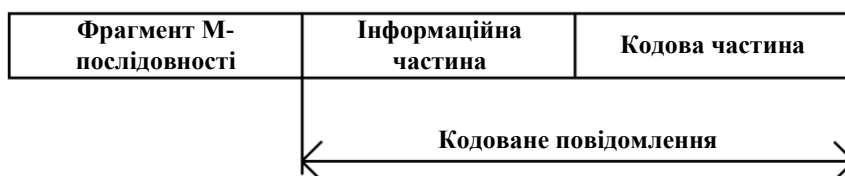


Рисунок 3.2 – Структура кадру повідомлення

Блок синхронізації здійснює розділення кадру на закодоване повідомлення та фрагмент М-послідовності.

Принцип такого розділення базується на відстеженні появи у потоці даних фрагмента М-послідовності. Оскільки будь-які  $m = 15$  бітів М-послідовності формують наступні біти, для синхронізації достатньо знати порядок генерації М-послідовності, щоб за 15 прийнятими бітами почати формувати пробну

послідовність, яка надалі порівнюватиметься з отриманими бітами. Якщо прийняті біти збігаються з обчисленими (навіть з деякими помилками), робиться висновок про встановлення синхронізації. Оскільки розмір фрагмента М-послідовності у кадрі відомий, при його виявленні у потоці даних можна виділити й кодоване повідомлення, розмір якого також відомий.

Для економії часу та обчислювальних ресурсів після встановлення синхронізації перевірка фрагментів М-послідовності на збіги здійснюється не в кожному кадрі, а вибірково через певну кількість прийнятих кадрів, що залежить від рівня шуму у каналі [1, 2]. Кодовані повідомлення надходять з блоку синхронізації до процедури декодування, вибір якої визначається співвідношенням сигнал-шум, а фрагменти М-послідовності передаються до блоку оцінки співвідношення сигнал-шум, де і визначається поточна якість зв'язку.

Блок оцінки співвідношення сигнал-шум функціонує за принципом, подібним до синхронізації повідомлень, проте оброблювані масиви даних у ньому значно більші.

На рисунку 3.3 представлена блок-схема, що демонструє процеси в блоці оцінки співвідношення сигнал-шум. Оскільки на вхід блоку надходять лише фрагменти М-послідовності, можна вважати, що при безперебійній роботі системи синхронізації блок постійно отримує біти М-послідовності [4].

Робота блоку починається з запису перших 15 прийнятих бітів у регістр формування М-послідовності. Далі, спираючись на ці 15 бітів, виконується обчислення наступних бітів М-послідовності, які вважаються передбачуваними. Одночасно з обчисленням передбачуваних бітів триває прийом прийнятих від блоку синхронізації бітів. Кожен передбачуваний біт порівнюється з відповідним прийнятим бітом, формуючи статистику невідповідностей між обчисленими та прийнятими бітами. Збір такої статистики триває до досягнення необхідної кількості порівнянь, достатньої для оцінки частоти бітових помилок (BER). Необхідна кількість порівнянь може змінюватися залежно від умов роботи системи.

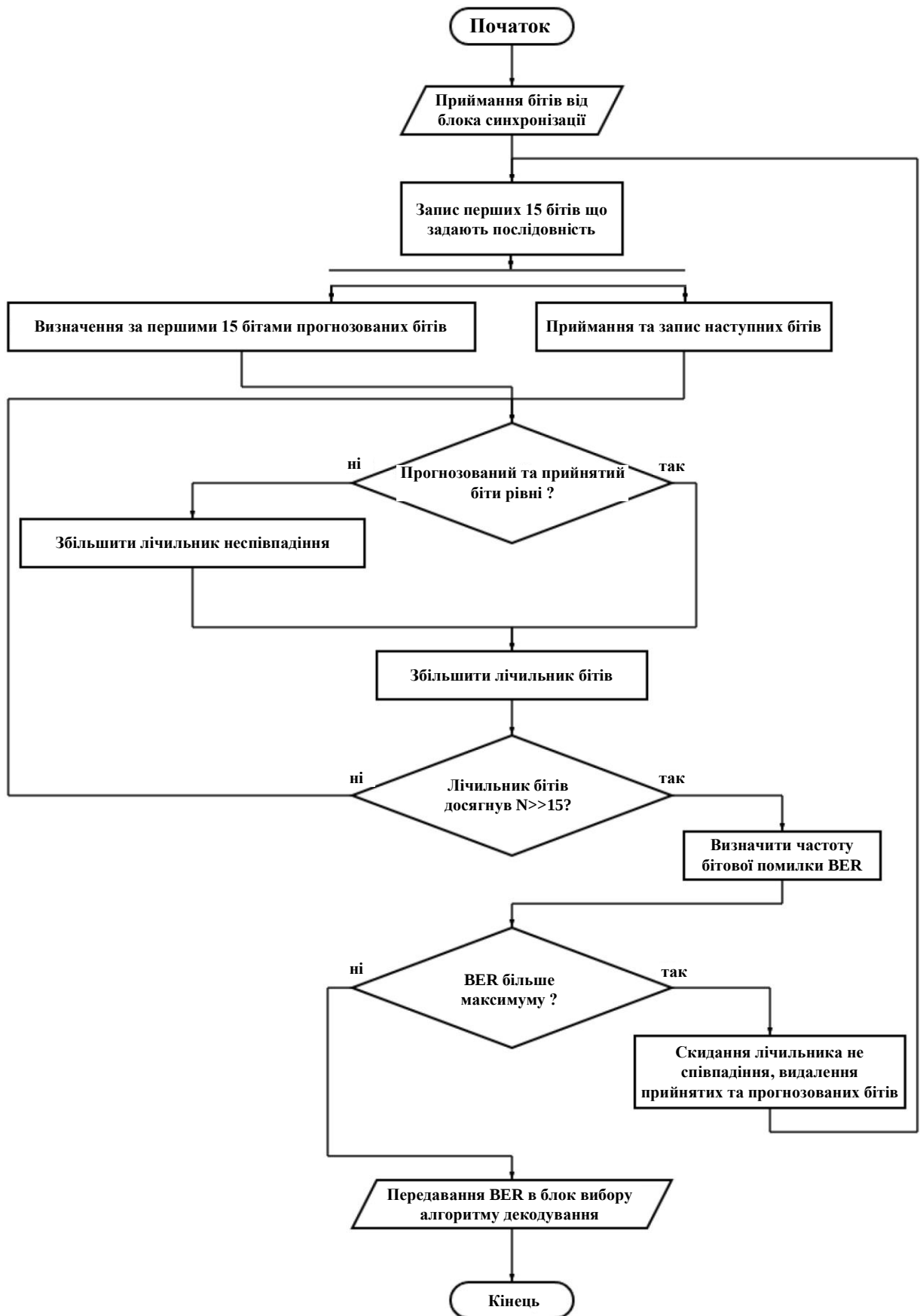


Рисунок 3.3 – Блок-схема алгоритму оцінювання співвідношення сигнал/шум

У разі, якщо кількість невідповідностей зростає дуже швидко, тобто передбачувані біти М-послідовності значно відрізняються від прийнятих, процес збору статистики може бути припинений, і алгоритм розпочинається заново [5].

У разі, якщо значення коефіцієнта бітових помилок (BER) перевищує встановлене граничне значення, робиться висновок про ймовірність помилки, яка могла виникнути або на етапі синхронізації, або при визначенні початкової 15-бітної послідовності, що використовувалася для формування очікуваної m-послідовності.

У такій ситуації можливі два підходи до корекції:

Базовий підхід полягає у скиданні поточного значення BER, фіксації нових 15 прийнятих бітів як нової базової послідовності для генерації m-послідовності, після чого весь алгоритм обчислення BER повторюється з початку.

Розширений підхід передбачає зсув поточної 15-бітної послідовності на один розряд із додаванням наступного прийнятого біта. На основі оновленої послідовності повторно запускається процес обчислення BER. Якщо ж отримане значення BER знаходиться в межах допустимого рівня, воно передається до наступного функціонального блоку системи — блоку вибору алгоритму декодування.

Коефіцієнт бітових помилок BER (ймовірність помилки на біт) пов'язується з енергетичним співвідношенням сигнал/шум ( $E_b/N_0$ ) згідно з аналітичною залежністю [3, 10]:

$$P_{\text{біт}} = Q \left( \sqrt{\frac{E_{\text{біт}}}{N_0}} \right), \quad (3.1)$$

у випадку використання дворівневої амплітудної маніпуляції (Binary Amplitude Shift Keying, BASK)

$$P_{\text{біт}} = Q \left( \sqrt{\frac{2E_{\text{біт}}}{N_0}} \right), \quad (3.2)$$

при застосуванні двійкової фазової маніпуляції (BPSK)

$$P_{\text{біт}} = 2Q \left( \sqrt{\frac{2E_{\text{біт}} \log_2 M}{N_0}} \sin \frac{\pi}{M} \right), \quad (3.3)$$

для багаторівневої фазової маніпуляції (M-PSK), де:

$M$  — кількість рівнів (фазових станів) сигналу,

$E_{\text{біт}}$  — енергія сигналу, що припадає на один інформаційний біт,

$N_0$  — спектральна щільність потужності шуму (на одиницю частотної смуги),

$Q(x)$  — функція ймовірності помилки (Гаусова Q-функція), яка визначається як:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (3.4)$$

Таким чином, параметри BER і відношення сигнал/шум є взаємопов'язаними й у певному сенсі тож самими: за наявності одного з них можна обчислити інший у разі потреби. Варто зазначити, що сам коефіцієнт бітових помилок (BER) також є самостійним індикатором якості каналу зв'язку.

Блок вибору алгоритму декодування порівнює поточне значення BER із заздалегідь визначеними пороговими рівнями та приймає рішення щодо доцільного вибору алгоритму корекції помилок. У цей самий блок надходить закодована частина повідомлення, яка в подальшому обробляється відповідно до обраного методу декодування [14].

Блок статистичної обробки здійснює побітове порівняння між початковим інформаційним повідомленням і повідомленням, отриманим після застосування коригувального алгоритму. Результатом такої обробки є оцінена ймовірність бітової помилки після корекції.

Розглянутий алгоритм з гнучким вибором методу корекції забезпечує вибір оптимального варіанта з точки зору як завадостійкості, так і обчислювальної ефективності. Такий підхід дозволяє при низькому рівні завад застосовувати прості та швидкі алгоритми, що сприяє підвищенню швидкості обробки інформації. Це, у свою чергу, може бути використано або для збільшення швидкості передавання даних, або, в найпростішому випадку, для зниження навантаження на обчислювальні ресурси, тобто зменшення енергоспоживання, що є критично важливим для мобільних пристроїв, які працюють від автономних джерел живлення.

На перший погляд може скластися враження, що реалізація блоків синхронізації та оцінки співвідношення сигнал/шум потребує значних часових і обчислювальних ресурсів, що нівелює ефективність використання простих алгоритмів в умовах низького рівня завад. Проте в будь-якій системі зв'язку передбачено етап синхронізації, а в тих випадках, коли приймач не має інформації про момент початку передавання, застосовуються алгоритми синхронізації, подібні до розглянутого в цій роботі. Отже, час, витрачений на синхронізацію, є типовим як для звичайних систем зв'язку, так і для систем, що оцінюють якість каналу, тому ним можна знехтувати при порівнянні обчислювальних витрат. Крім того, обчислення, пов'язані з оцінкою співвідношення сигнал/шум, можуть виконуватися паралельно з процесом декодування поточних повідомлень, а отже, не впливають на загальну швидкість обробки даних [5].

### **3.2 Результати комп'ютерного моделювання**

На рисунку 3.4 зображено криві завадостійкості, отримані в результаті моделювання функціонування системи з адаптивним вибором алгоритму декодування, а також криві завадостійкості для окремих коригувальних алгоритмів, розглянутих у попередніх розділах, які наведені для порівняння.



З метою наочності, порогові значення відношення сигнал/шум (ВСШ) було підбрано таким чином, щоб забезпечити імовірність бітової помилки не більше ніж  $10^{-3}$ . Це зумовило відповідність між значеннями ВСШ та застосовуваними алгоритмами декодування, як показано в таблиці 3.1.

У процесі моделювання були задані кілька рівнів ОСШ у діапазоні від 1 до 7 дБ. Для кожного з рівнів здійснювалася передача  $10^7$  кодових слів, закодованих згідно з кодом Хеммінга (15,11).

Таблиця 3.1 — Відповідність між порогами ВСШ та вибраними алгоритмами декодування

|                   |                    |
|-------------------|--------------------|
| ВСШ               | Задіяний алгоритм  |
| Менше 4 дБ        | Алгоритм Чейза     |
| Від 4 до 4,3 дБ   | Стирання з вибором |
| Від 4,3 до 5,2 дБ | Стирання           |
| Більше 5,2 дБ     | Алгоритм Хеммінга  |

Як видно з рисунка 3.4, алгоритм з адаптивним вибором методу декодування, залежно від поточного рівня відношення сигнал/шум (ВСШ), застосовує оптимальний з точки зору обчислювальних витрат коригувальний метод, здатний забезпечити задану імовірність бітової помилки. Такий підхід дозволяє знизити навантаження на обчислювальні ресурси апаратної частини системи.

На рисунку 3.5 подано діаграми, які ілюструють кількість машинних тактів, необхідних для обробки одного блоку даних відповідними алгоритмами. У випадку алгоритму з вибором декодувального методу показано середнє значення кількості машинних тактів, оскільки воно змінюється в залежності від поточного рівня ВСШ.

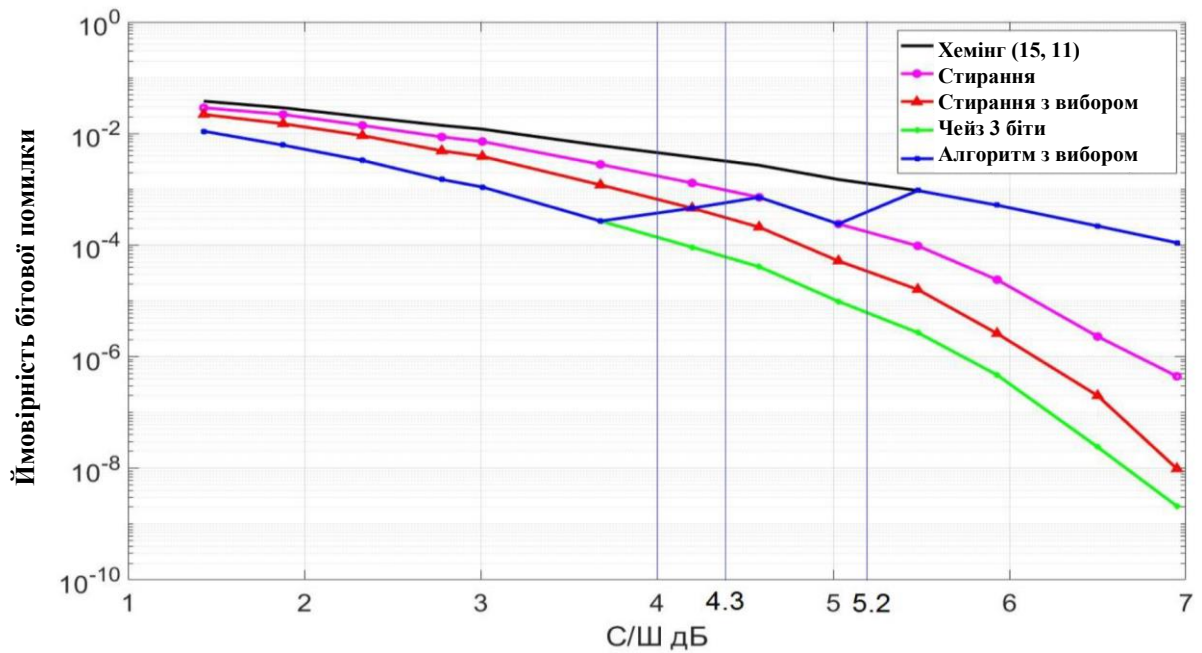


Рисунок 3.4 – Порівняння завадостійкості при виборі декодувального алгоритму для  $BER \leq 10^{-3}$

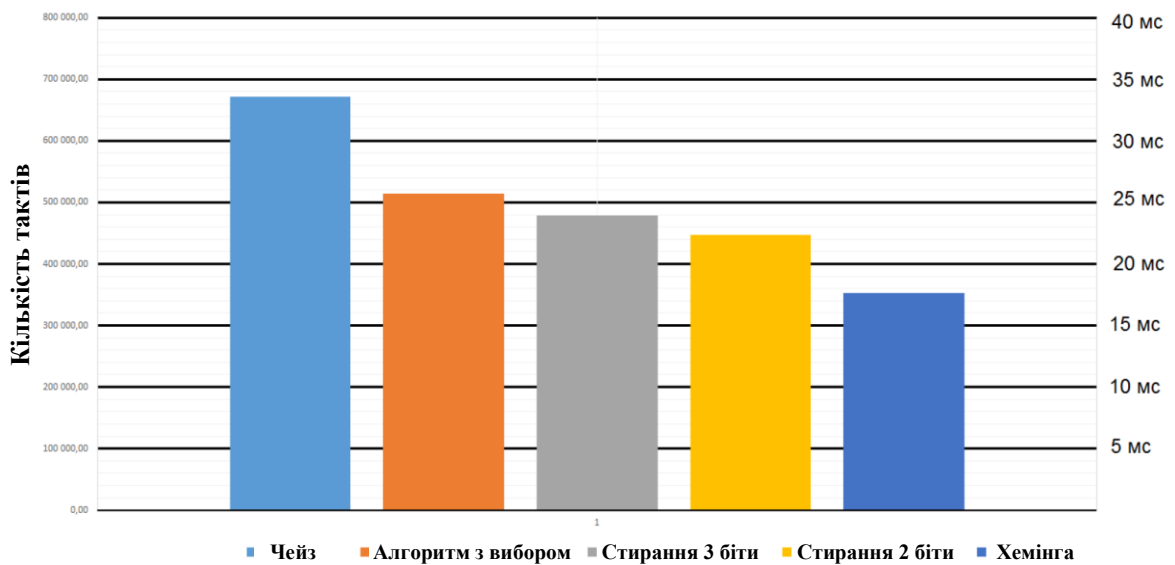


Рисунок 3.5 – Оцінювання обчислювальних витрат алгоритму з адаптивним вибором для заданої ймовірності помилки  $10^{-3}$

Згідно з діаграмою, для забезпечення ймовірності бітової помилки не вище  $10^{-3}$ , алгоритм з вибором в середньому потребує на  $1,5 \cdot 10^5$  машинних тактів

менше, ніж алгоритм Чейза, і лише на  $5 \cdot 10^4$  машинних тактів більше, ніж алгоритм декодування стирань з вибором. Таким чином, забезпечуючи необхідну якість зв'язку, адаптивний алгоритм витрачає менше обчислювальних ресурсів, ніж найскладніший із розглянутих у роботі методів.

Нижче наведено приклад роботи алгоритму з адаптивним вибором методу декодування за умови, що ймовірність бітової помилки не повинна перевищувати значення  $10^{-4}$ . Системи зв'язку з таким рівнем надійності можуть мати практичне значення в ряді критичних застосувань, тому доцільно проаналізувати й цей сценарій після розгляду прикладу функціонування алгоритму на рівні бітової помилки  $10^{-3}$ , коли залучаються всі розглянуті методи декодування.

Для забезпечення цільового рівня ймовірності бітової помилки  $10^{-4}$  було встановлено відповідність між рівнями відношення сигнал/шум (ВСШ) та відповідними алгоритмами декодування, як представлено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 — Відповідність між рівнями ВСШ та методами декодування для  $BER \leq 10^{-4}$

| <b>ВСШ</b>        | <b>Задіяний алгоритм</b> |
|-------------------|--------------------------|
| Менше 4,7 дБ      | Алгоритм Чейза           |
| Від 4,7 до 5,5 дБ | Стирання з вибором       |
| Від 5,5 до 7 дБ   | Стирання                 |
| Більше 7 дБ       | Алгоритм Хемінга         |

У межах проведеного моделювання значення відношення сигнал/шум (ВСШ) не перевищувало 6,95 дБ, у зв'язку з чим код Хеммінга жодного разу не був обраний як робочий алгоритм декодування, оскільки необхідно було забезпечити ймовірність бітової помилки не вище  $10^{-4}$ .

На рисунку 3.6 зображено криві завадостійкості алгоритму з адаптивним вибором, орієнтованого на досягнення заданого рівня імовірності бітової помилки  $10^{-4}$ . Усі інші умови моделювання залишалися аналогічними до попереднього дослідження.

З рисунка видно, що внаслідок зміни порогових значень відношення сигнал/шум (ВСШ), у більшій частині досліджуваного діапазону буде переважно застосовуватись алгоритм Чейза, тоді як алгоритм Хеммінга фактично не використовується. Це зумовлює зростання середнього числа машинних тактів, необхідних для обробки одного кодового слова. Оскільки алгоритм з адаптивним вибором використовує менш обчислювально складні методи при високих значеннях ВСШ у порівнянні з методом Чейза, середнє значення кількості тактів, яке витрачається цим алгоритмом, є меншим, ніж у випадку використання методу Чейза.

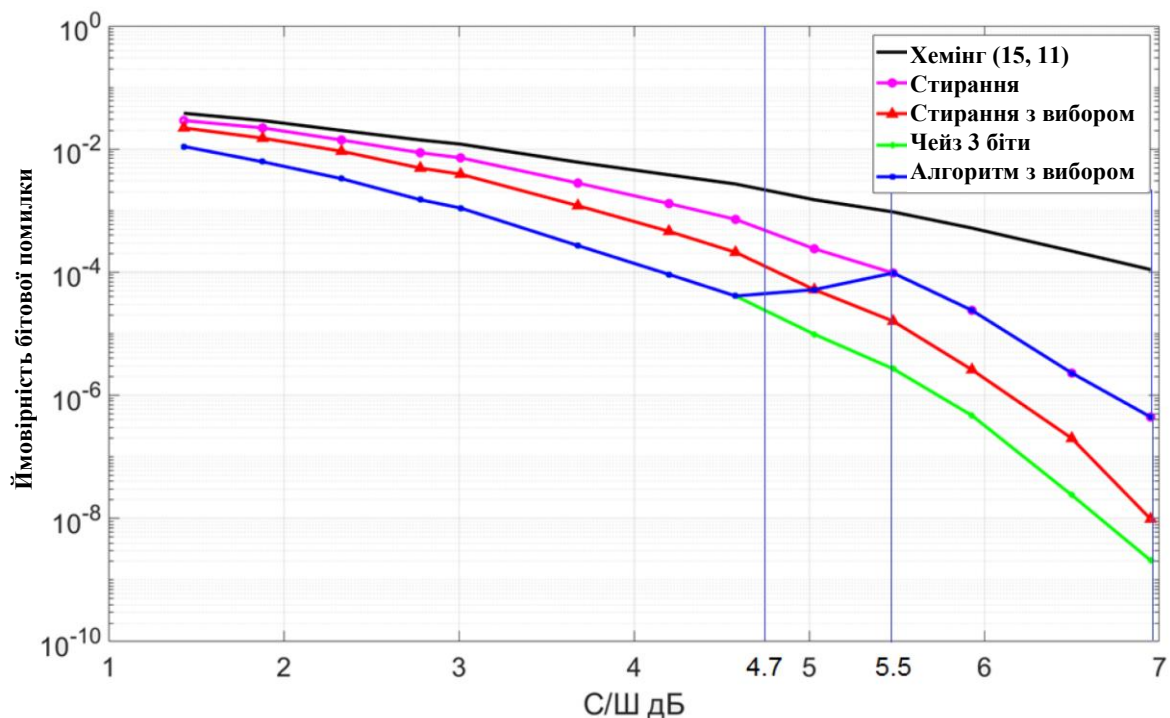


Рисунок 3.6 – Поведінка алгоритму з вибором при високих вимогах до надійності  $BER \leq 10^{-4}$

Згідно з діаграмою на рисунку 3.7, спостерігається зростання середнього числа тактів, витрачених алгоритмом з вибором на обробку одного кодового слова, порівняно з результатами попереднього моделювання.

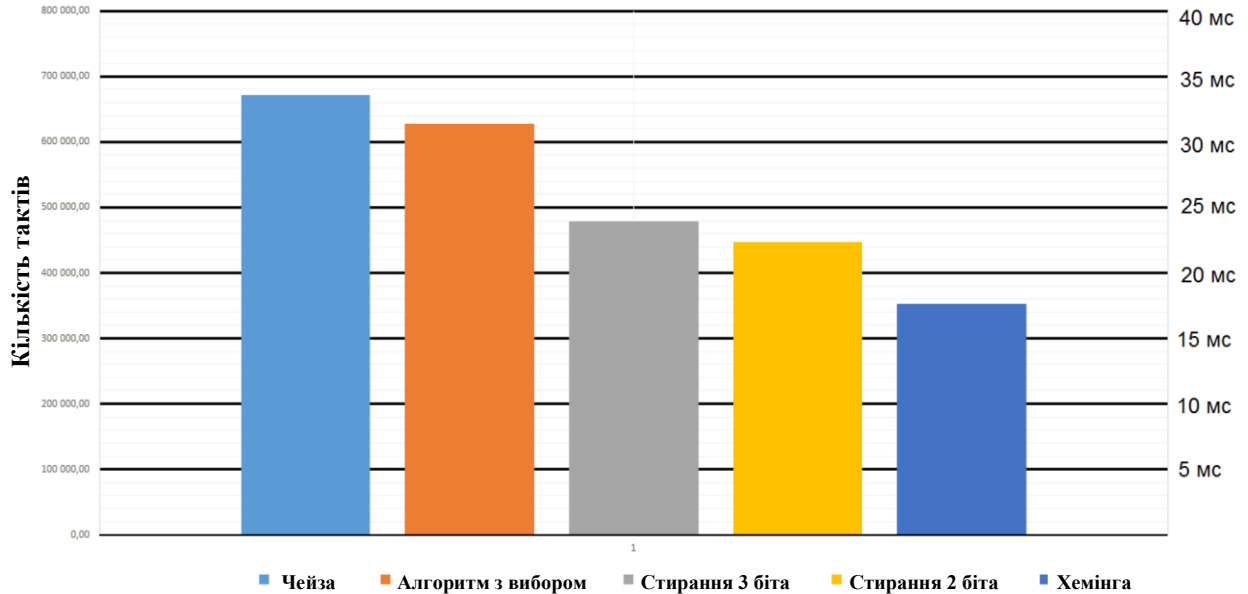


Рисунок 3.7 – Обчислювальна складність алгоритму з адаптивним вибором при ймовірності помилки на рівні  $10^{-4}$

### 3.3 Висновки до розділу 3

Використання системи з адаптивним вибором методу корекції помилок залежно від значення відношення сигнал/шум (ВСШ) дає змогу оптимально задіювати обчислювальні ресурси апаратної платформи. Це, щонайменше, сприяє зниженню енергоспоживання, а в перспективі відкриває можливість використання вивільнених ресурсів для підвищення швидкості передавання даних.

Застосований у розглянутій системі алгоритм оцінювання ВСШ не потребує додаткового апаратного забезпечення, оскільки реалізується програмно. Це дає змогу інтегрувати його в уже наявні пристрої без необхідності апаратних модифікацій.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Головна мета охорони праці полягає у зменшенні ймовірності травмування та захворюваності працівників, одночасно забезпечуючи зручні умови для досягнення максимальної ефективності праці. Звичайні виробничі процеси часто пов'язані з певними ризиками та потенційними небезпеками. Будь-які відхилення від стандартного режиму роботи та порушення правил безпеки можуть мати негативний вплив на здоров'я працівників. Тому постійне вдосконалення системи охорони праці на підприємстві є важливим як з соціальної, так і з економічної точки зору. Отже, першочерговим завданням є створення комплексної системи охорони праці, яка б органічно входила в усі етапи виробництва на кожному підприємстві та сприяла зростанню загальної продуктивності. Ефективна система охорони праці не лише захищає працівників, але й підвищує їхню мотивацію та лояльність до компанії. Інвестиції в безпечні умови праці є запорукою сталого розвитку підприємства та його позитивного іміджу.

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори, які відповідно до Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу» мали вплив під час дослідження методів підвищення завадостійкості мобільних телекомунікаційних систем такі наступні: підвищена чи понижена температура повітря робочої зони; недостатнє освітлення робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; відсутність чи нестача природного світла; фізичні перевантаження (статичні); пряма та відображена блискість; нервово - психічні перевантаження (перенапруга аналізаторів, емоційні навантаження).

Відповідно до визначених факторів формуємо рекомендації щодо безпечних умов праці під час виконання роботи.

## **4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи**

### **4.1.1 Обладнання приміщення та робочого місця**

Оснащення робочого місця відіграє визначальну роль у забезпеченні продуктивної та безпечної праці. Наявність необхідних інструментів, технічних засобів та сприятливого робочого середовища сприяє підвищенню ефективності роботи та зниженню ймовірності травм і негативного впливу на здоров'я працівників. Завдяки належному обладнанню робочого місця стає можливим якісно та швидко виконувати поставлені завдання, скорочувати час, необхідний для їх реалізації, та покращувати якість кінцевого продукту або послуги. Окрім цього, правильно обладнане робоче місце сприяє збереженню здоров'я та безпеці працівників, оскільки допомагає запобігати травматизму та захищає від дії шкідливих виробничих факторів.

Для дослідження умов праці об'єктом аналізу обрано робоче місце, де виконується кваліфікаційна робота на тему «Метод підвищення завадостійкості мобільних телекомунікаційних систем». На даному робочому місці необхідно передбачити заходи захисту від потенційного впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів. Важливо, щоб рівні цих факторів не перевищували встановлених граничних значень, визначених правовими, технічними та санітарно-технічними нормами.

Оскільки досліджувана робота виконується за ПК з використанням відповідного програмного забезпечення, буде проведено аналіз параметрів приміщення на предмет їхньої відповідності вимогам НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями». Загальна площа приміщення становить 20,7 м<sup>2</sup>, а його об'єм – 64 м<sup>3</sup>. У приміщенні працює 3 особи, кожна з яких має комп'ютеризоване робоче місце. Таким чином, на одного працівника припадає 6,9 м<sup>2</sup> робочої площі та 21,3 м<sup>3</sup> об'єму повітря, що відповідає встановленим нормативам.

Головним робочим місцем розробника є письмовий стіл з персональним комп'ютером. Достатній простір для виконання роботи забезпечується такими заходами:

- вільну досяжність органів ручного керування в зоні моторного поля (відстань по висоті – 900-1330 мм, по глибині – 400-500 мм);
- екран монітора ПК повинен знаходитися від очей користувача ПК на відстані 600-700 мм;
- клавіатура повинна розміщуватися так, щоб на ній було зручно виконувати роботу двома руками. Кут нахилу до панелі клавіатури повинен бути в межах від 5 до 25°;
- принтер повинен бути розташований у зручному для користувача місці – відстань до клавіш керування принтером не перевищувала довжину витягнутої руки;
- висота робочої поверхні стола – 725 мм; робочий стіл повинен мати простір для ніг висотою не менше 600 мм, шириною не менше 450 мм, на рівні витягнутих ніг – не менше 650 мм.

Органи керування, зокрема клавіатура, монітор та миша, а також інструменти, що використовуються систематично, повинні бути розташовані в межах оптимальної досяжності рук без потреби нахилятися. Предмети, які використовуються рідше, такі як носії інформації та довідкові матеріали, можуть знаходитися у віддаленій зоні або на спеціальних полицях, згідно з вимогами ДСТУ 8604:2015.

Вимоги охорони праці перед початком роботи:

- привести в порядок робоче місце;
- впевнитися, що на ньому відсутні сторонні предмети;
- переконатися, що всі пристрої і блоки ПК під'єднані до системного блоку.

Перевірити:

- наявність та надійність захисного заземлення устаткування;
- справність вимикачів та інших органів управління ПК;
- справність роз'ємів кабелів електроживлення;



- відсутність пошкоджень ізоляції проводів живлення;
- відсутність відкритих струмопровідних частин у пристроях ПК.

Наступним кроком необхідно вжити заходів для запобігання потрапляння прямих сонячних променів на екрани пристроїв, а також протерти клавіатуру злегка вологою серветкою (для зменшення статичної електрики) та зовнішню поверхню монітора. Рівень освітленості в приміщеннях з комп'ютерами слід контролювати за допомогою сонцезахисних пристроїв. Перед підключенням пристроїв до електромережі необхідно переконатися, що всі вимикачі живлення на комп'ютерному обладнанні знаходяться у положенні «вимкнено». У разі виявлення будь-яких несправностей комп'ютерну техніку не вмикати та негайно повідомити керівництво.

Дотримання правил безпеки та ергономічних норм під час роботи з персональним комп'ютером є ключовим для забезпечення високої продуктивності та збереження здоров'я працівників. Правильне розміщення обладнання, регулювання освітлення та здійснення регулярних профілактичних дій допомагають запобігти потенційним проблемам і створюють сприятливе робоче середовище. Оперативне виявлення та повідомлення керівництву про будь-які несправності є важливим для підтримання безперебійної та ефективної роботи обладнання, а також для гарантування безпеки персоналу.

#### **4.1.2 Електробезпека приміщення**

Усі технічні пристрої та обладнання, включаючи комп'ютери, спеціалізовані периферійні засоби, а також засоби для обслуговування, ремонту та налагодження комп'ютерів, які використовуються під час дослідження, відповідають всім актуальним стандартам та нормативним вимогам з охорони праці, діючим в Україні, зокрема відповідають НПАОП 0.00-7.15-18 та ДСанПіН 3.3.2.007-98.

За критеріями електробезпеки приміщення, в якому проводилося дослідження, належить до категорії приміщень без підвищеної небезпеки,

оскільки характеризується сухістю, відсутністю високих температур та підвищеної вологості, а підлога має струмоізоляційне покриття (відповідно до Правил улаштування електроустановок). Електроживлення силового обладнання та системи освітлення в приміщенні забезпечується чотирипровідною трифазною мережею з напругою 380/220 В (де фазна напруга між фазою та нулем становить 220 В, а міжфазна напруга між двома фазами – 380 В).

У приміщенні вжито комплекс заходів для запобігання ураженню електричним струмом, серед яких обов'язкове заземлення всіх потенційно небезпечних електроустановок та надійна ізоляція струмопровідних елементів обладнання. Побутова та комп'ютерна електромережі функціонують роздільно, а персонал проінформовано про необхідність дотримання особливої обережності при проведенні ремонтних робіт з обладнанням. На випадок пожежі в коридорі розміщено детальний план евакуації з позначенням напрямків руху та евакуаційних шляхів, які повністю відповідають чинним стандартам пожежної безпеки. Будівля обладнана двома евакуаційними виходами, широкими коридорами (2-3 метри) та дверима завширшки 0,8 метра, що відчиняються за напрямком евакуаційного потоку, забезпечуючи безпечну та оперативну евакуацію у випадку надзвичайної ситуації. Додатково, для підвищення рівня безпеки, слід регулярно перевіряти стан заземлення та ізоляції електроустановок. Також необхідно забезпечити наявність та справність засобів пожежогасіння в легкодоступних місцях. Періодичні навчальні евакуації допоможуть персоналу відпрацювати дії у випадку пожежі та зменшити час евакуації.

Питання забезпечення безпеки праці та захисту від потенційних небезпек у приміщенні є пріоритетним для організації. Впроваджені заходи, такі як заземлення та ізоляція електрообладнання, розділення електричних мереж, інформування співробітників та обладнання коридору для евакуації, свідчать про відповідальний підхід до гарантування безпеки всіх осіб, які перебувають у приміщенні. Дотримання існуючих стандартів і процедур сприяє створенню сприятливих та безпечних умов для роботи та ефективного реагування на надзвичайні ситуації.

## 4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

### 4.2.1 Мікроклімат

Нормування параметрів мікроклімату в робочій зоні відбувається з урахуванням пори року, категорії виконуваних робіт за рівнем енерговитрат та наявності надлишкового тепла в приміщенні. За величиною енергетичних витрат праця дослідника класифікується як «легка фізична робота». Допустимі значення параметрів мікроклімату для категорії 1 б згідно з Державними санітарними нормами ДСН 3.3.6.042-99 наведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату

| Період року | Допустимі |      |         |
|-------------|-----------|------|---------|
|             | t, °C     | W, % | V, м/с  |
| Теплий      | 21-28     | 75   | 0,1-0,3 |
| Холодний    | 20-24     | 75   | 0,1     |

Для забезпечення оптимальних умов праці необхідно регулярно контролювати температуру, вологість та швидкість руху повітря в робочій зоні. У випадку відхилення від допустимих норм слід вживати заходів для їхнього регулювання. Для досягнення необхідних параметрів мікроклімату в приміщенні використовується централізована парова система опалення під час холодного періоду року з метою обігріву, система припливно-витяжної вентиляції разом із систематичним провітрюванням, а також використання зволожувачів повітря для підвищення рівня вологості в повітрі. Ці технологічні рішення сприяють підтримці комфортних мікрокліматичних параметрів у приміщенні, а також забезпечують здорові умови для праці та перебування людей.

#### 4.2.2 Склад повітря робочої зони

У повітрі приміщення, де ведеться дослідження, потенційно можуть бути присутні такі шкідливі речовини, як вуглекислий газ, пил та озон, джерелом яких є офісне обладнання. Пил може проникати в приміщення ззовні через віконні та дверні отвори, а також заноситися співробітниками. Це зумовлює необхідність регулярного прибирання та підтримання належної якості повітря для запобігання накопиченню пилу та шкідливих речовин.

Згідно з Державними санітарними нормами ДСН 3.3.6.042-99, концентрація шкідливих хімічних речовин у виробничих приміщеннях, де основною діяльністю є робота з ПК, не повинна перевищувати гранично допустимих значень, наведених у таблиці 4.2. Крім того, рівні позитивних та негативних іонів у повітрі таких приміщень повинні відповідати нормам, зазначеним у таблиці 4.3.

Таблиця 4.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

| Назва речовини  | ГДК, мг/м <sup>3</sup> |                 | Клас небезпечності |
|-----------------|------------------------|-----------------|--------------------|
|                 | Максимально разова     | Середньо добова |                    |
| Вуглекислий газ | 3                      | 1               | 4                  |
| Пил нетоксичний | 10                     | 4               | 4                  |
| Озон            | 0,16                   | 0,03            | 1                  |

Таблиця 4.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

| Рівні                 | Кількість іонів в 1 см <sup>3</sup> |           |
|-----------------------|-------------------------------------|-----------|
|                       | n+                                  | n-        |
| Мінімально необхідні  | 400                                 | 600       |
| Оптимальні            | 1500-3000                           | 3000-5000 |
| Максимально необхідні | 50000                               | 50000     |

Забезпечення оптимального повітряного середовища в приміщенні здійснюється завдяки функціонуванню вентиляційної системи та регулярному вологому прибиранню. При необхідності можливе провітрювання приміщення шляхом відкриття вікон та дверей для покращення якості повітря. Однак важливо дотримуватися встановлених графіків вологого прибирання та технічного обслуговування вентиляційних систем.

### 4.2.3 Виробниче освітлення

Виробниче освітлення є ключовим фактором для гарантування безпеки, зручності та продуктивності праці у виробничих умовах, тому його належне проектування та застосування є вкрай важливими аспектами в контексті охорони праці та організації виробничих процесів. У приміщенні, де проводилося дослідження, використовується як штучне, так і природне освітлення. Відповідно до ДБН В.2.5-28:2018, для такого типу приміщень необхідно застосовувати систему комбінованого освітлення. Освітлення робочих місць забезпечується природним світлом протягом світлового дня та штучним освітленням у темний час доби. Нормативні значення освітленості при штучному освітленні та коефіцієнт природної освітленості (КПО) для III поясу світлового клімату при природному та комбінованому освітленні детально наведені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 - 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 і бокове | Бокове | Верхнє або верхнє і бокове | 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 оптимального зорового комфорту та запобігання стомлюваності очей, важливо правильно комбінувати природне та штучне освітлення, уникаючи різких перепадів яскравості. Регулярне очищення вікон та

світильників, а також своєчасна заміна ламп, що вийшли з ладу, є необхідними умовами для підтримання належного рівня освітленості. Також слід враховувати розташування робочих місць відносно джерел світла, щоб уникнути засліплення та відблисків на робочих поверхнях.

#### 4.2.4 Виробничий шум

Вплив шуму на людський організм визначається інтенсивністю та частотою звукових хвиль, тривалістю його дії, а також фізичним і психологічним станом людини. Шум негативно позначається на кількості та якості виконуваної роботи, оскільки ускладнює концентрацію уваги. Крім того, він спричиняє фізичну втому, оскільки організм витрачає додаткову енергію на протидію його впливу, що може призвести до порушення фізіологічних функцій. Слід враховувати, що тривалий вплив шуму може мати несприятливі наслідки для здоров'я працівників, зокрема погіршити їхній психофізичний стан.

У приміщенні, де проводилося дослідження, основним джерелом шуму є функціонуюча офісна техніка. Санітарні норми щодо виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку, встановлені ДСН 3.3.6.037-99 для умов виконання даної роботи, представлені у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного широкополосного шуму

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

Для підтримання прийняттого рівня шуму рекомендується використовувати обладнання з пасивною системою охолодження, а також встановити пластикові

вікна з покращеними звукоізоляційними характеристиками. Ці заходи допоможуть знизити рівень шуму в приміщенні та підвищити комфорт працівників. Додатково, у випадку зростання рівня шуму, можна розглянути застосування інших методів зменшення шумового впливу, таких як звукоізоляція приміщення за допомогою акустичних матеріалів, встановлення звукопоглинальних перегородок або використання навушників з активним шумопоглинанням.

#### 4.2.5 Виробничі випромінювання

Під час виконання роботи на досліджника впливає підвищений рівень електромагнітного поля, джерелами якого є функціонуюча офісна техніка (ПК, принтер, сканер, копіювальний апарат) та електрична мережа приміщення. Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань, наведені у таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – 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<br>для дітей 15кВ/м |

Для досягнення встановлених параметрів безпеки та комфорту необхідно застосовувати виключно високоякісне обладнання, що має сертифікат відповідності, який підтверджує його надійність та безпеку під час експлуатації, а також забезпечити дотримання оптимальних режимів праці та відпочинку для

працівників. Виконання цих рекомендацій сприятиме підтриманню належного стану обладнання та створенню сприятливих умов праці для співробітників.

### 4.3 Пожежна безпека

Приміщення, в якому здійснювалося дослідження, класифікується за пожежною безпекою як категорія В (згідно з таблицею 4.7). Це означає, що в приміщенні присутні горючі рідини або тверді горючі речовини та матеріали, здатні самозайматися або спалахувати від джерела запалювання. У зв'язку з цим необхідно вжити додаткових протипожежних заходів, таких як встановлення автоматичної пожежної сигналізації та систем пожежогасіння. Також важливо забезпечити наявність первинних засобів пожежогасіння (вогнегасників) та регулярно проводити інструктажі з персоналом щодо правил пожежної безпеки та дій у випадку пожежі.

Таблиця 4.7 - Категорія приміщення за вибухопожежною і пожежною небезпекою

| Категорія приміщення | Характеристика речовин і матеріалів, що знаходяться у приміщенні                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| В                    | Пожежонебезпечна Тверді горючі та важкогорючі речовини і матеріали, за умови, що приміщення, в яких вони знаходяться, не відносяться до категорій А, Б і питома пожежна навантага для твердих і рідких легкозаймистих та горючих речовин на окремих ділянках площею не менше 10 м <sup>2</sup> кожна перевищує 180 МДж/м <sup>2</sup> . |

Конструкція будівлі, де розміщено приміщення, відноситься до II-го ступеня вогнестійкості (будівля з несучою конструкцією з природних матеріалів або штучного каменю, бетону або залізобетону з застосуванням листових і плиткових негорючих матеріалів). Згідно з правилами улаштування електроустановок, приміщення відноситься до класу II-Па пожежної небезпеки (приміщенні, у якому знаходяться тверді горючі речовини та матеріали).



#### **4.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі**

До основних факторів, що можуть призвести до пожежі в приміщенні, належать: короткі замикання в електричній мережі; перевантаження електромережі та надмірний нагрів струмопровідних елементів і з'єднань; а також порушення встановлених правил вимог безпеки. У випадку виникнення аварійних ситуацій відбувається інтенсивне виділення теплової енергії, яка може стати безпосередньою причиною займання.

Для запобігання виникненню пожежі необхідно вжити наступних профілактичних заходів: систематично перевіряти справність усіх струмопровідних частин обладнання; регулярно проводити протипожежні інструктажі з персоналом; неухильно дотримуватися вимог пожежної безпеки на кожному робочому місці. Крім того, рекомендується встановити автоматичну систему пожежної сигналізації для раннього виявлення загоряння. Важливо також забезпечити наявність первинних засобів пожежогасіння (вогнегасників) у легкодоступних місцях та навчити персонал правилам їх використання. Регулярне очищення приміщення від горючого пилу та матеріалів також є важливим елементом протипожежної безпеки.

#### **4.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту**

У даному приміщенні передбачається можливість застосування автоматичної системи пожежогасіння. Крім того, рекомендується використання установки порошкового пожежогасіння, де вогнегасною речовиною слугує спеціальний нетоксичний порошок. Для своєчасного оповіщення про виникнення пожежі в приміщенні встановлено пожежну сигналізацію. Після завершення робочого дня необхідно відключати від електроживлення всі електроприлади, а також їхні мережі (за винятком протипожежних та охоронних систем). Електричні проводи для підключення комп'ютерів та іншого обладнання повинні прокладатися по негорючих будівельних конструкціях.

Відповідно до встановлених норм, на кожні 20 м<sup>2</sup> площі приміщення зазначеної категорії та класу пожежовибухонебезпеки, а також для можливих класів пожеж А, В і Е, необхідно розміщувати один порошковий або вуглекислотний вогнегасник з масою вогнегасної речовини від 3 до 5 кілограмів. Додатково, на поверсі, де розташоване дане приміщення, слід забезпечити наявність двох порошкових вогнегасників з масою заряду 10 кілограмів кожен.

Таким чином, у приміщенні буде розміщено два порошкових вогнегасники, розташованих в різних його кінцях на висоті, що не перевищує 1,5 метра від рівня підлоги до нижнього краю корпусу, та на такій відстані від дверей, яка забезпечить їх повне відкриття. Підходи до вогнегасників мають бути постійно вільними від будь-яких перешкод. Для чіткого позначення місць їх знаходження будуть встановлені розпізнавальні знаки на добре видимих ділянках стін на висоті 2,0 - 2,5 метра від підлоги. Регулярні перевірки терміну придатності та працездатності вогнегасників є обов'язковими. Персонал приміщення буде проінструктовано щодо правил використання вогнегасників у випадку пожежі. Також буде забезпечено наявність журналу обліку вогнегасників для контролю їхнього стану.

## ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження розроблено, проаналізовано та підтверджено ефективність нового адаптивного методу, який забезпечує вибір оптимального коригувального алгоритму відповідно до поточних умов зв'язку.

Виконано поставлену задачу — розробку системи зв'язку, яка забезпечує необхідну якість передавання інформації шляхом комплексного застосування методів завадостійкого кодування та декодування.

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Розроблено та підтверджено методами математичного моделювання алгоритм декодування стирань з адаптивним вибором, а також алгоритм декодування стирань з використанням вибору та синдрому. Обидва алгоритми демонструють перевагу в завадостійкості до 1,8 дБ у порівнянні зі стандартними алгоритмами декодування.

2. Розроблено та підтверджено математичним моделюванням алгоритм, що здійснює вибір оптимального методу декодування залежно від поточного значення співвідношення сигнал/шум у каналі передавання. Запропонований підхід забезпечує необхідну якість зв'язку та знижує обчислювальні витрати в 1,5 рази.

3. У випадку багаторазових сеансів передавання-перепередавання повідомлень (ретрансляцій) в умовах дії шуму на переданий сигнал застосування повного перекодування повідомлень забезпечує приріст завадостійкості до 2 дБ при використанні складних алгоритмів декодування.

4. На основі створеної математичної моделі проведено перевірку функціонування запропонованих алгоритмів, яка підтвердила їхню ефективність.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Li L., Chang C.-C., Lin C.-C. Reversible data hiding in encrypted image based on (7, 4) Hamming code and unit-smooth detection / L. Li, C.-C. Chang, C.-C. Lin // *Entropy*. – 2021. – Vol. 23. – Basel: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. – P. 1–24.
2. Andrews K., Berner J., Chen V., Dolinar S., Pollara F., Stanton V. Turbo-decoder implementation for the deep space network. IPN Progress Report 42-148, Feb. 15, 2002.
3. V. V. Kniaziev, V. Kravchenko, B. Lazurenko, O. Serkov, K. Trubchaninova, and N. Panchenko, “Development of methods and models to improve the noise immunity of wireless communication channels,” *Eastern-Europe. J. Enterp. Technol.*, vol. 1, no. 5(115), pp. 35–42, 2022, doi: 10.15587/1729-4061.2022.253458.
4. V. Tolubko, L. Berkman, E. Gavrylko, O. Barabash, and O. Kilmeninov, “Development of methods to improve noise immunity in the fifth-generation mobile networks based on multiposition signals,” *Eastern-Europe. J. Enterp. Technol.*, vol. 6, no. 9, 2018, doi: 10.15587/1729-4061.2018.152713.
5. A. A. Sathe, A. A. Ingole, A. D. Shinde, G. P. Vyawahare, and V. S. Khandare, “Noise in telecommunications: Challenges and their strategies—A review,” *Int. J. Adv. Res. Sci., Commun. Technol.* [Online]. Available: [<https://www.ijarsct.co.in/Paper19975.pdf>](<https://www.ijarsct.co.in/Paper19975.pdf>) . [Accessed: May 20, 2025].
6. J. G. Proakis and M. Salehi, *Digital Communications*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2008.
7. S. Haykin, *Communication Systems*, 4th ed. New York, NY, USA: Wiley, 2001.
8. B. Sklar, *Digital Communications: Fundamentals and Applications*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, 2001.
9. T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2013.

10. A. F. Molisch, *Wireless Communications*, 2nd ed. New York, NY, USA: Wiley, 2012.
11. D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005.
12. A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005.
13. A. G. Fowler, "Noise immunity in modern communication systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, no. 4, pp. 102–110, 2002.
14. Y. Zhang and Q. Huang, "Advanced error correction techniques for wireless mobile networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 58, no. 7, pp. 2034–2042, 2010.
15. J. Lee and S. Sun, "Adaptive filtering for noise reduction in wireless communication," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 28, no. 4, pp. 18–26, 2011.
16. J. Choi and T. Kang, "Spread spectrum techniques for enhanced noise immunity in mobile systems," in *Proc. IEEE Vehicular Technol. Conf.*, 2015, pp. 1–5.
17. E. Kwon and M. Kim, "Modulation schemes and their impact on noise immunity," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 21, no. 11, pp. 2506–2510, 2017.
18. A. Gupta and P. Sharma, "Interference cancellation methods in modern mobile networks," *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 32, no. 1, p. e3846, 2019.
19. A. Özgür et al., "Broadband wireless communications and noise immunity: A comprehensive overview," *IEEE Wireless Commun. Mag.*, vol. 14, no. 6, pp. 9–16, 2007.
20. S. Lin and D. J. Costello, *Error Control Coding*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2004.
21. C. Wang and H. V. Poor, "Wireless communication systems: Advanced techniques for noise immunity," *Proc. IEEE*, vol. 96, no. 5, pp. 905–918, 2008.
22. D. Smith and R. Jones, "Comprehensive framework for noise immunity in telecommunication systems," *J. Adv. Telecommun. Res.*, vol. 15, no. 2, pp. 75–85, 2020.

23. Наказ від 08.04.2014 № 248 Про затвердження Державних санітарних норм та правил Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу - [Електронний ресурс] - Режим доступу: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/topiccatalogua/labor-protection/14.\\_nakazy\\_ta\\_rozpor\\_183575/248+58074-detail.html](http://online.budstandart.com/ua/catalog/topiccatalogua/labor-protection/14._nakazy_ta_rozpor_183575/248+58074-detail.html)

24. ДСТУ 8604:2015 Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги - [Електронний ресурс] - [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=71028](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=71028)

25. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=79885](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885)

26. 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\\_праор\\_0\\_00-7\\_15-18\\_01\\_ua.php](http://sop.zp.ua/norm_праор_0_00-7_15-18_01_ua.php)

27. ДСанПіН 3.3.2.007-98 Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ЕОМ - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/derzhavni-sanitarni-pravila-i-normi-roboti-z-vizualnimi-disp-nor4881.html>

28. 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>

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

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

31. Кодекс цивільного захисту України від 02.10.2012 № 5403-VI

32. НАПБ А.01.001-14 Правила пожежної безпеки в Україні [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon.nau.ua/doc/?code=z1410-04>
33. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: [https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu\\_b\\_v\\_1\\_1\\_36/5-1-0-1759](https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759).
34. ДБН В.1.1.7-2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва - [Електронний ресурс] - Режим доступу: [http://www.poliplast.ua/doc/dbn\\_v.1.1-7-2002..pdf](http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002..pdf)

Додаток А  
(обов'язковий)

**ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА**  
**МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ МОБІЛЬНИХ**  
**ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

назва бакалаврської кваліфікаційної роботи



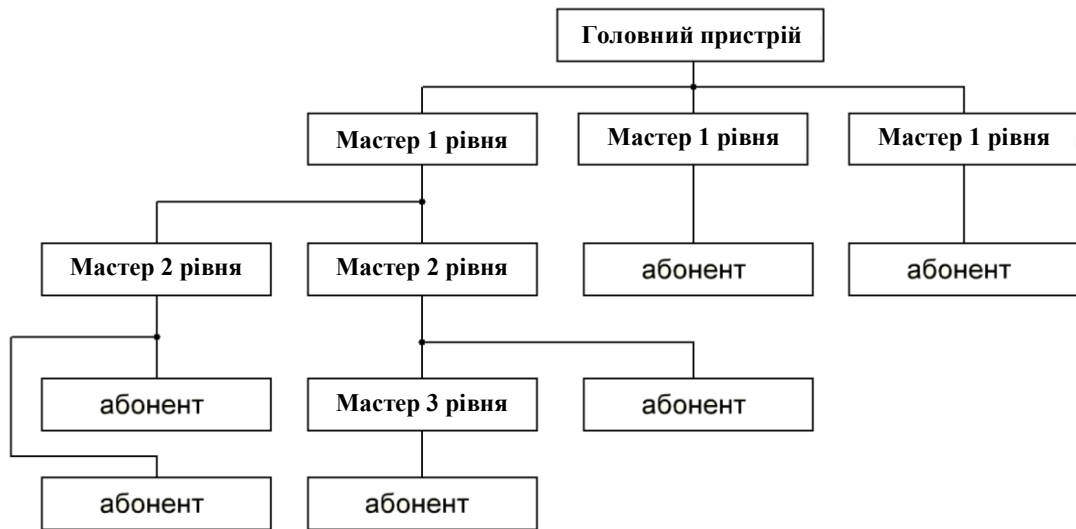


Рисунок 1 – Будова розподіленої мережі зв'язку

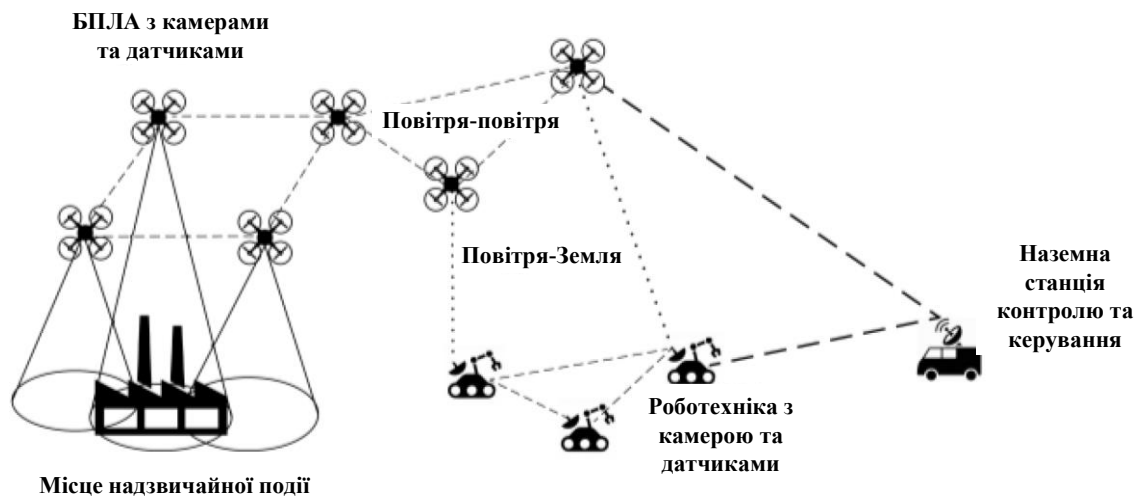


Рисунок 2 – Система взаємодії безпілотних авіаційних платформ

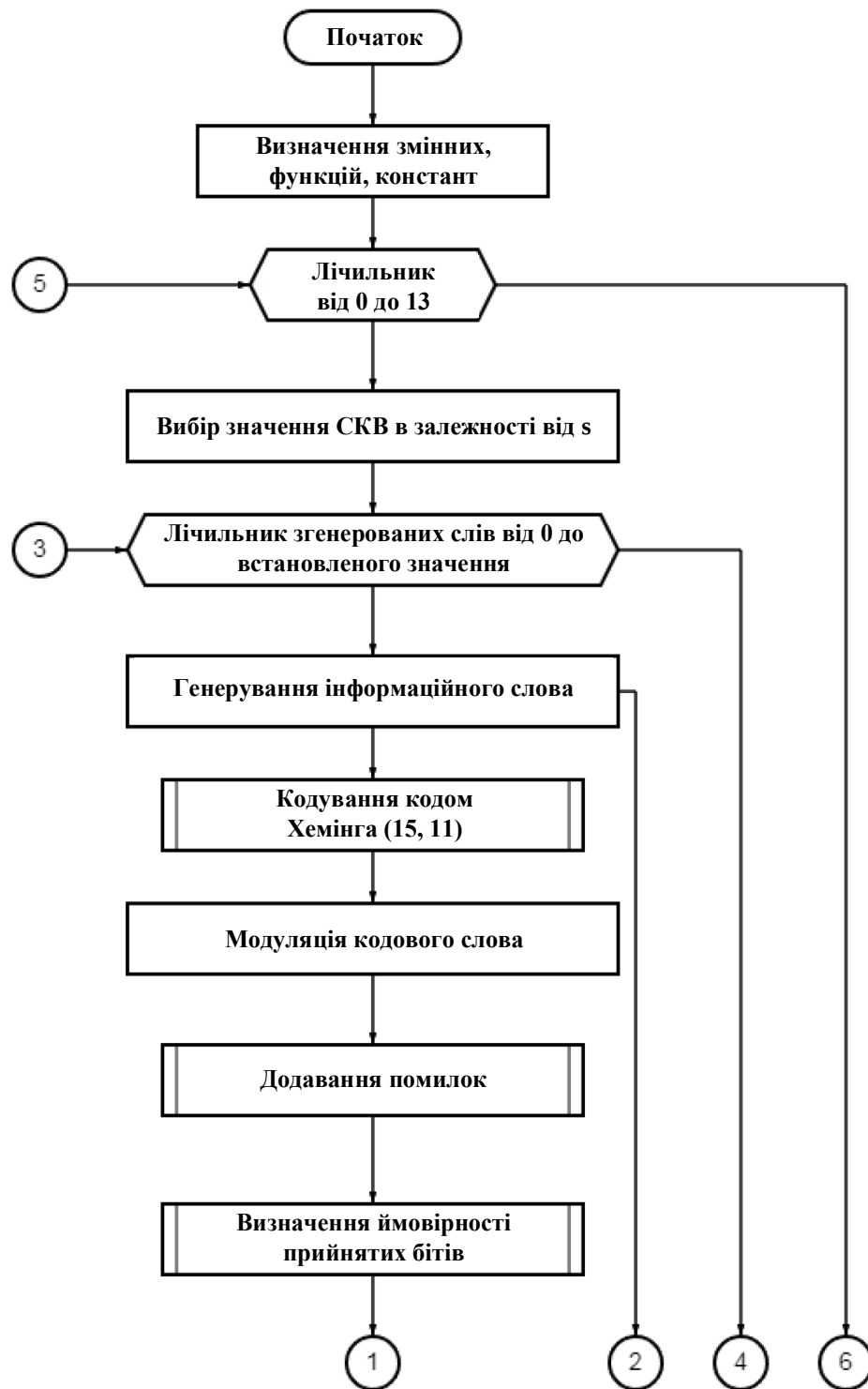


Рисунок 3 – Структурна схема математичної моделі (початкова частина)

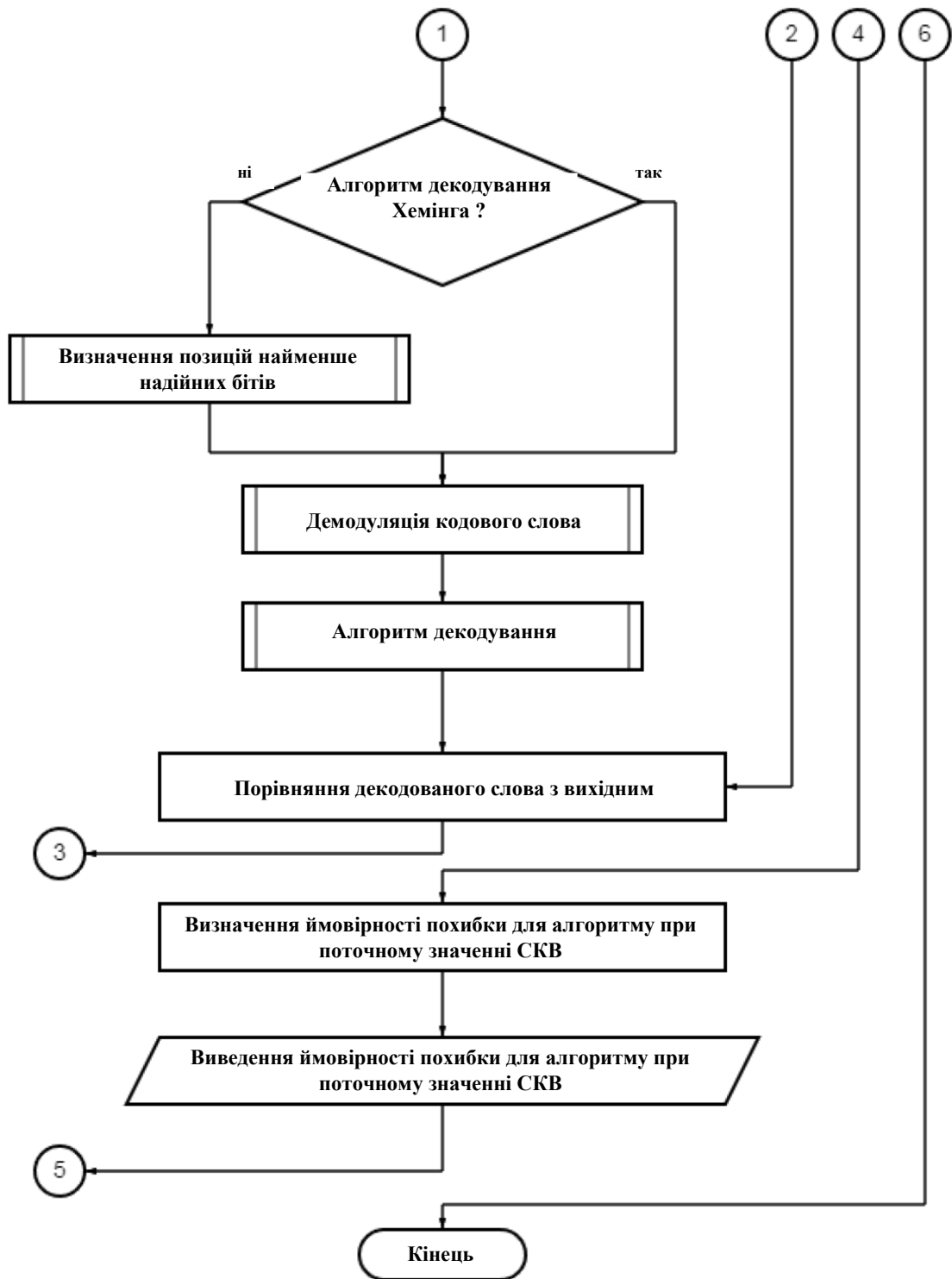


Рисунок 4 – Структурна схема математичної моделі (продовження)

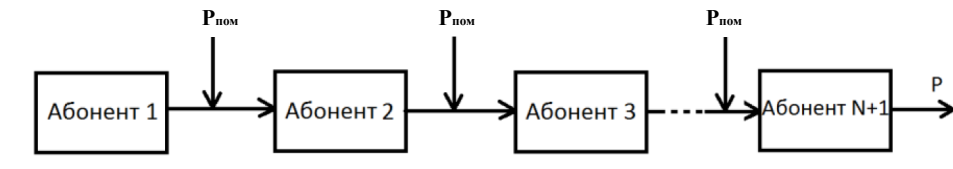


Рисунок 5 – Схема маршрутизації повідомлення між послідовно з'єднаними абонентами

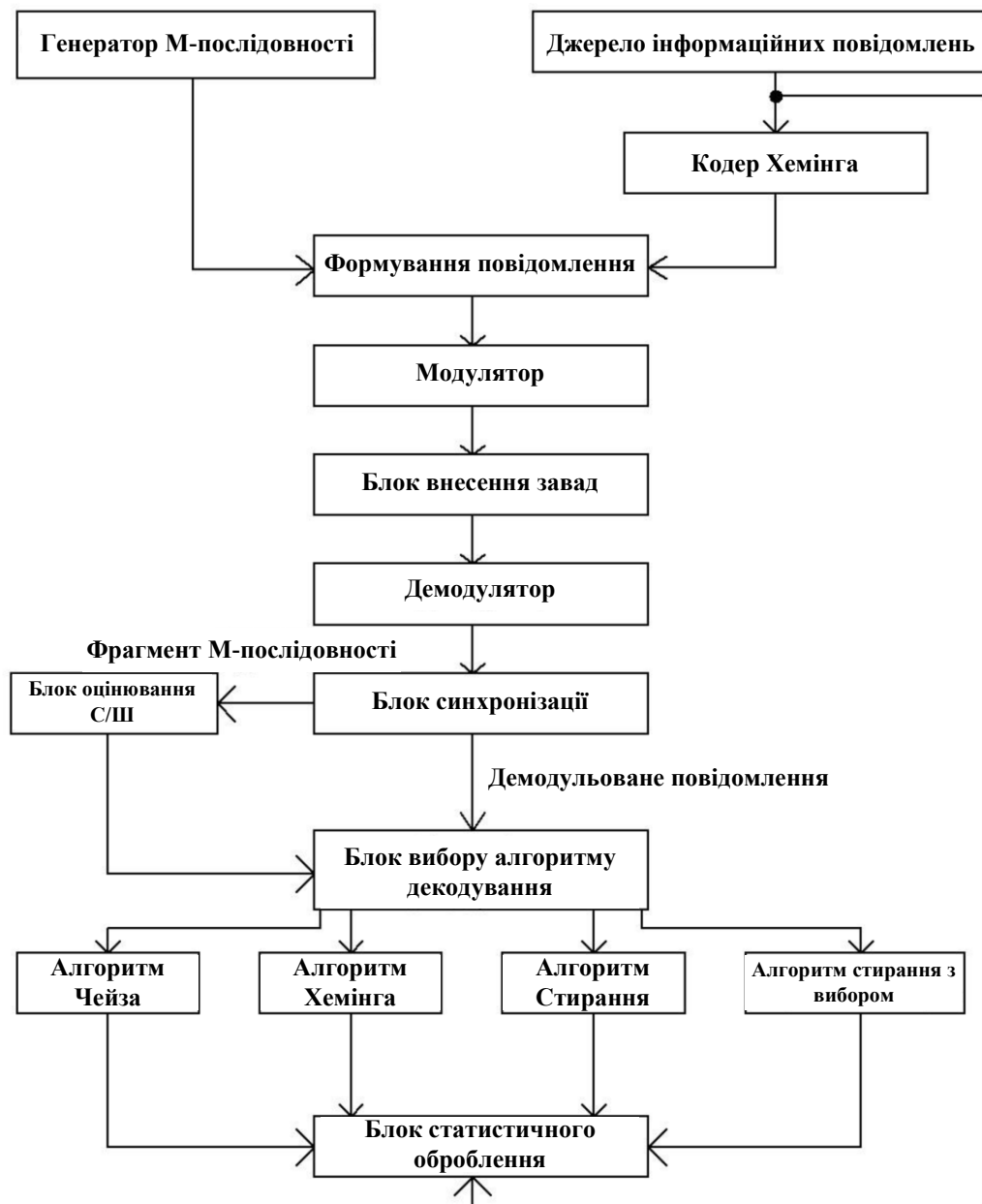


Рисунок 6 – Структурна схема моделі системи з гнучким вибором алгоритмів корекції помилок

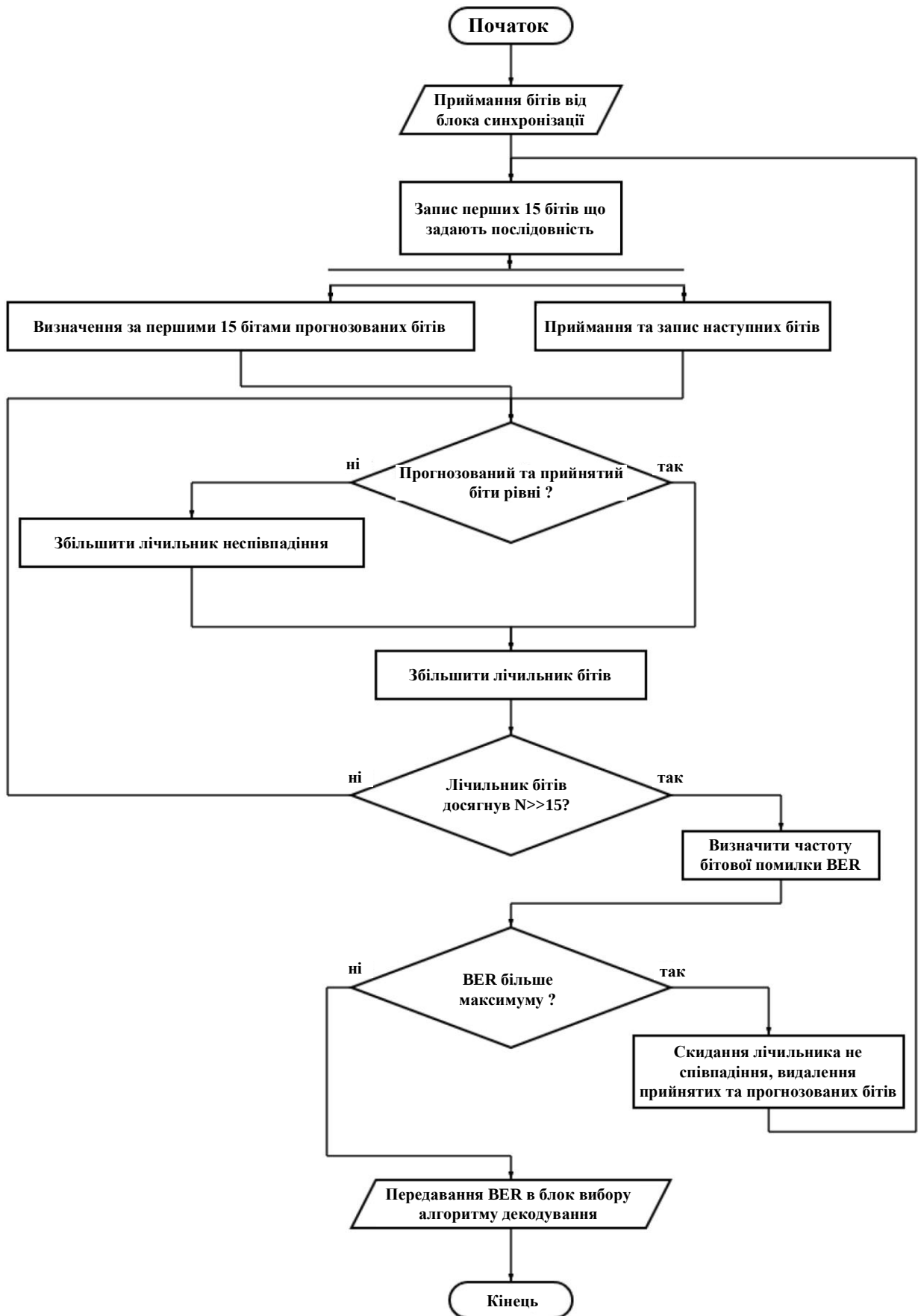


Рисунок 7 – Блок-схема алгоритму оцінювання співвідношення сигнал/шум

## Додаток Б

## ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Метод підвищення завадостійкості мобільних телекомунікаційних систем

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота  
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ кафедра ІКСТ, факультет ІЕС, група ПЗТ-23мс  
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 0,27 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- ☐ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Кичак В.М., завідувач кафедри ІКСТ

(прізвище, ініціали, посада)

Васильківський М.В., гарант ОПП

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Васильківський М.В.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

(підпис)

Васильківський М.В., доцент кафедри ІКСТ

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувачка

(підпис)

Черняк Д.О.

(прізвище, ініціали)