

## **Пояснювальна записка**

до кваліфікаційної роботи  
другого (магістерського) рівня

на тему **АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ МОДЕМІВ**

Виконав: студент 2 курсу, групи КТК-2.1  
спеціальності  
172 Телекомунікації та радіотехніка

\_\_\_\_\_  
Проценко Р.В.

Керівник \_\_\_\_\_ Розенвассер Д.М.

Рецензент Григор'єва Т. І.

# ДОВІДКА

кафедри КІ та ІТ про виконану магістерську роботу

студента 2 курсу ФКПІ та КН групи КТК-2.1

Проценко Романа Васильовича

на тему Аналіз надійності модемів

Висновок нормоконтролера Посвідчено замісно до кваліфікаційної роботи виконано з керуванням параметрами DCT3. Оформлено згідно вимог функціонального положення МГУ.  
Нормоконтролер к.т.н., доцент [підпис] В.В. Педес  
(науковий ступінь, вчене звання, посада) (підпис, дата) (і. б. прізвище)

Висновок відповідального за наявність плагіату Згідно з сервісним номером ID 1015433302 унікальність роботи підтверджена.  
Відповідальна особа к.т.н., доцент [підпис] В.В. Педес  
(науковий ступінь, вчене звання, посада) (підпис, дата) (і. б. прізвище)

Попередня експертиза (захист) \_\_\_\_\_ магістерської роботи  
(бакалаврської роботи чи магістерської роботи)

студ. Проценко Р.В. проведена "15" 12 2022р.  
(прізвище і.б.)

Висновки Кваліфікаційна робота виконана у повному обсязі. В роботі проведено аналіз надійності модемів. Кваліфікаційна робота відповідає вимогам до випускних кваліфікаційних робіт зі спеціальності "ІТ2 Телекомунікації" та радіотехніка та рекомендована до захисту.

Члени комісії [підпис] к.т.н., доцент Мона Л.Т.  
(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище і.б.)  
[підпис] к.т.н., доцент Педес В.В.  
(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище і.б.)  
[підпис] вик Швец О.В.  
(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище і.б.)

# МІЖНАРОДНИЙ ГУМАНІТАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет кібербезпеки, програмної інженерії та комп'ютерних наук  
Кафедра комп'ютерної інженерії та інноваційних технологій  
Освітній ступінь магістр  
Галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації  
Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КІ та ІТ

к.т.н., доц.

Л.Г.Йона

“ 25 ” 09 2023 року

## ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

Проценко Роману Васильовичу

- Тема роботи: Аналіз надійності модемів
- керівник роботи Розенвассер Денис Михайлович, к.т.н., доцент каф. комп'ютерних наук  
затверджені наказом закладу вищої освіти від 25.09.2023 р. № 1955
- Строк подання студентом роботи 11.12.2023
- Вихідні дані до роботи: Задано модеми різних типів, необхідно проаналізувати надійність модемів, варіанти підвищення надійності різними методами, у тому числі структурним резервуванням та завадостійким кодуванням
- Зміст розрахунково-пояснювальної записки  
Розділ 1: Класифікація модемів  
Розділ 2: Засоби підвищення надійності модемів  
Розділ 3: Аналіз надійності модемів
- Перелік графічного матеріалу (з зазначенням обов'язкових креслень)  
Слайд 1 – Класифікація модемів

Слайд 2 – Структурне та функціональне резервування

Слайд 3 – Інформаційне резервування

Слайд 4 – Виграш надійності

Слайд 5 – Висновки та рекомендації

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 25.09.2023 р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	25.09.2023-5.10.2023	<i>вск</i>
2	Класифікація модемів	6.10.2023-19.10.2023	<i>вск</i>
3	Засоби підвищення надійності модемів	20.10.2023-5.11.2023	<i>вск</i>
4	Аналіз надійності модемів	6.11.2023-20.11.2023	<i>вск</i>
5	Висновки та рекомендації	21.11.2023-28.11.2023	<i>вск</i>
6	Перелік посилань	29.11.2023-5.12.2023	<i>вск</i>
7	Оформлення презентації	6.12.2023-08.12.2023	<i>вск</i>

Студент *С. Шибанов*  
(підпис)

Р.В. Проценко

Керівник роботи *Д.М. Розенвассер*  
(підпис)

Д.М. Розенвассер

## ВІДГУК КЕРІВНИКА

магістерської роботи студента Проценко Р.В.  
на тему: «Аналіз надійності модемів»

Завдання вивчення проблем надійності модемів є актуальною темою для існуючих інформаційних систем.

У роботі розглядаються різні типи модемів, їхня класифікація, методи оцінки та підвищення надійності. Наведено розрахунки виграшу надійності при структурному та інформаційному резервуванні.

Студент Проценко Р.В. добре розібрався з усіма проблемами надійності модемів і основну увагу приділив докладному аналізу використання резервування для підвищення надійності модемів.

Робота проводилася значною мірою самостійно. Графік консультацій не порушувався.

Завдання на КР виконано. Необхідні для цього розрахунки проведені. При оформленні пояснювальної записки та демонстраційних слайдів використовувались комп'ютерні технології.

Під час виконання магістерської роботи студент Проценко Р.В. глибоко вивчив питання оцінки надійності модемів, показав уміння користуватись навчальною та технічною літературою, ставити та розв'язувати інженерні задачі.

Магістерська робота відповідає вимогам до випускних магістерських робіт. Робота студента Проценко Р.В. заслуговує оцінки «добре».

Студент Проценко Р.В. заслуговує присвоєння кваліфікації магістр з телекомунікацій та радіотехніки за заявленою спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Керівник  
к.т.н., доцент кафедри КН



Д.М. Розенвассер

## РЕЦЕНЗІЯ

на магістерську роботу студента Проценко Р.В.  
на тему: «Аналіз надійності модемів»

Магістерська робота містить 3 розділи текстової частини, демонстраційні слайди, виконана згідно з завданням на магістерську роботу.

У роботі розглядається проблема оцінки та підвищення надійності модемів.

Актуальність теми полягає в тому, що на сьогоднішній день практично всі галузі життя залежать від комп'ютерних мереж, а мережі залежать від компонентів, у тому числі модемів. Для підвищення надійності модемів використовують різні методи, такі як структурне, функціональне та інформаційне резервування, моніторинг та тестування. Також виникає задача порівняння ефективності різних методів підвищення надійності, яка була вирішена в даній роботі.

Магістерська робота виконана відповідно до завдання. Демонстраційні матеріали й пояснювальна записка виконані охайно й відповідно до вимог. Прийняті рішення обґрунтовано, розрахунки виконано правильно.

Автором показана достатня теоретична підготовка. Робота виконана грамотно, текст її послідовний та зрозумілий, оформлення роботи та демонстраційних слайдів якісне.

До недоліків роботи варто віднести:

- не виконано практичних досліджень;
- не проведено економічного аналізу щодо рентабельності запропонованих рішень.

Зазначені недоліки суттєво не знижують якості виконаної роботи.

Магістерська робота відповідає вимогам до випускних кваліфікаційних робіт магістрів. Робота студента Проценко Р.В. заслуговує оцінки «добре».

Студент Проценко Р.В. заслуговує присвоєння кваліфікації магістр з телекомунікацій та радіотехніки за заявленою спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Рецензент

к.т.н., доцент, зав. кафедри ІТ



Григор'єва Т.І.

Имя пользователя:  
Анна Серединко

Дата проверки:  
28.12.2023 10:49:06 EET

Дата отчета:  
28.12.2023 10:50:44 EET

ID проверки:  
1016039518

Тип проверки:  
Doc vs Internet + Library

ID пользователя:  
100001433

Название файла: диплом Проценко +вст+вис

Количество страниц: 42    Количество слов: 6593    Количество символов: 48635    Размер файла: 2.67 MB    ID файла: 1015733302

## 18.6% Совпадения

Наибольшее совпадение: 7.92% с источником из Библиотеки (ID файла: 1015327938)

10.8% Источники из Интернета	156	.....	Страница 44
8.31% Источники из Библиотеки	3	.....	Страница 45

## 0% Цитат

Исключение цитат выключено

Исключение списка библиографических ссылок выключено

## 0% Исключений

Нет исключенных источников

## Модификации

Обнаружены модификации текста. Подробная информация доступна в онлайн-отчете.

Замененные символы    95

## РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської роботи: 45 с., 23 рисунки, 6 таблиць, 1 додаток, 21 джерело.

МОДЕМИ, МОДУЛЯЦІЯ, РЕЗЕРВУВАННЯ, FEC, ARQ, ЕВК, ФМ-М, КАМ-М, КОД РІДА-СОЛОМОНА, ЗГОРТКОВИЙ КОД, КАСКАДНИЙ КОД, ТУРБО-КОД, LDPC КОД

Об'єкт дослідження – модеми та їхні компоненти.

Мета роботи – дослідження надійності модемів, методів її підвищення, резервування, порівняння виграшу надійності.

Метод дослідження – аналітичний з використанням комп'ютерних технологій.

У магістерській роботі проведено огляд модемів, досліджено підвищення надійності за рахунок різних методів резервування, тестування, моніторингу, використання високоякісних компонентів та обладнання, забезпечення оптимальних умов експлуатації.

Зроблено порівняння структурного та інформаційного резервування за показником виграшу надійності та втратами.



## ABSTRACT

The text part of the master paper: 45 pp., 23 figures, 6 tables, 1 appendix, 21 references.

MODEMS, MODULATION, RESERVATION, FEC, ARQ, ECG, MPSK, MQAM, REED-SOLOMON CODE, CONVOLUTIONAL CODE, CONCATENATED CODE, TURBO CODE, LDPC CODE

Object of research is modems and their components.

The purpose of the work is to study of the reliability of modems, methods of its improvement, redundancy, and comparison of reliability gains.

The research method is analytical with the use of computer technologies.

In the master paper a review of modems, research on increasing reliability due to various methods of redundancy, testing, monitoring, use of high-quality components and equipment, and provision of optimal operating conditions were carried out.

A comparison of structural and information redundancy was made based on the indicator of reliability gains and losses.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАК.....	10
ВСТУП.....	11
1 КЛАСИФІКАЦІЯ МОДЕМІВ .....	12
1.1 Види модемів.....	12
1.2 Типи підключення модемів.....	18
1.3 Програмне забезпечення модемів.....	20
1.4 Підтримка безпеки.....	21
1.5 Висновки до розділу 1.....	22
2 ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ МОДЕМІВ.....	23
2.1 Підвищення надійності модемів .....	23
2.2 Структурне та функціональне резервування.....	25
2.3 Інформаційне резервування.....	28
2.4 Виграш резервування.....	31
2.5 Моніторинг та тестування.....	32
2.6 Висновки до розділу 2.....	35
3 АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ МОДЕМІВ.....	37
3.1 Розрахунок завадостійкості модемів без кодування.....	37
3.2 Розрахунок завадостійкості модемів з кодуванням.....	39
3.3 Розрахунок надійності модемів зі структурним резервуванням.....	50
3.4 Висновки до розділу 3.....	51
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ .....	52
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	53
ДОДАТОК А.....	55

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАК

- PU – універсальний процесор
- DSP – центральний сигнальний процесор
- NMS - Network management system - системи моніторингу та віддаленого керування
- ПЗП, ROM – постійний запам'ятовуючий пристрій
- ППЗП, EPROM – постійний енергонезалежний перепрограмувальний запам'ятовуючий пристрій
- ОЗП, RAM – оперативний запам'ятовуючий пристрій
- DTE - Data Terminal Equipment – термінальне обладнання для передавання даних
- DCE - Data Communication Equipment – апаратура передавання даних
- PCI - Peripheral component interconnect - взаємозв'язок периферійних компонентів
- USB - Universal Serial Bus - універсальна послідовна шина
- FEC - Forward Error Correction - виправлення помилок вперед
- ARQ - Automatic Repeat Request - автоматичний запит повторної передачі
- SSD - Solid-state Drive - твердотілий накопичувач
- ЕВК – енергетичний виграш кодування
- КАМ, QAM – квадратурна амплітудна модуляція
- ФМ, PSK – фазова модуляція
- SNR - Signal Noise Ratio – відношення сигнал/шум
- БЧХ, BCH - коди Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема
- РС, RS – коди Ріда-Соломона
- TCC - Turbo Convolutional Codes - згорткові турбо-коди
- TPC - Turbo Product Codes - блокові турбо-коди добутку
- СКК – сигнально-кодова конструкція
- LDPC - Low-density parity-check code, код з малою щільністю перевірок на парність

## ВСТУП

Модеми є важливими компонентами мережі. Вони використовуються для передачі даних між різними пристроями в мережі. Аналіз надійності модемів допомагає гарантувати стійкість роботи мережі в цілому. Модеми, як і будь-які технічні пристрої, можуть вийти з ладу. Це може призвести до перерв у роботі мережі та втрати даних. Безпека мережі та захист від можливих атак також часто пов'язані з надійністю модемів. Надійні модеми впливають на загальну доступність послуг, наданих мережею. У високопропускних мережах, таких як мережі операторів мобільного зв'язку, надійність модемів є ключовою для забезпечення швидкого та стабільного передавання великої кількості даних. З ростом популярності Інтернету речей, де багато пристроїв взаємодіють через мережу, надійність модемів стає ключовою для забезпечення безперебійної роботи підключених пристроїв. Аналіз надійності модемів є важливим інструментом, який може допомогти підвищити надійність мереж. Отже задача аналізу надійності модемів є актуальною.

Метою роботи є дослідження надійності модемів, методів її підвищення, резервування, порівняння виграшу надійності.

У магістерській роботі проведено огляд модемів, досліджено підвищення надійності за рахунок різних методів резервування, тестування, моніторингу, використання високоякісних компонентів та обладнання, забезпечення оптимальних умов експлуатації. Зроблено порівняння структурного та інформаційного резервування за показником виграшу надійності та втратами.

У результаті дослідження зроблено висновок про переваги та недоліки різних методів підвищення надійності модемів.

# 1 КЛАСИФІКАЦІЯ МОДЕМІВ

## 1.1 Види модемів

Модеми є важливим компонентом будь-якої мережі, оскільки вони дозволяють пристроям підключатися до Інтернету та інших мереж. Модеми (модулятор-демодулятори) існують у різних типах та конфігураціях, призначених для різних типів мереж та послуг передачі даних. Однак модеми можуть вийти з ладу з різних причин, таких як поломка компонентів, перевантаження мережі або відключення електроенергії.

Під поняттям «модем» ми розуміємо пристрій, який перетворює цифрову інформацію, що поступає з одного комп'ютера, у аналогові сигнали, які можуть передаватися по телефонним лініям, та виконує зворотну операцію на приймальному кінці системи передавання. Модем об'єднує у собі два поняття: модулятор та демодулятор. Модулятор перетворює інформацію, яка надходить з комп'ютера у двійковому вигляді, в аналогову форму, що дозволяє передавати її через звичайні телефонні лінії. Демодулятор з сигналу, що надходить, отримує закодовану двійкову інформацію та передає її до комп'ютера на приймальному боці. При цьому дуже важливо використовувати однакові методи кодування/декодування і на прийомі, і на передачі.

Аналогові сигнали є синусоїдальними та косинусоїдальними хвилями, а цифрові сигнали представляються у вигляді прямокутних хвиль. Наприклад, звук є аналоговим сигналом, оскільки звук завжди змінюється. Аналоговий сигнал є тією інформацією, яка передається безперервно, у той час як цифровий сигнал передає тільки ті дані, які визначені у конкретний момент часу. Головною перевагою аналогових сигналів є можливість повністю представити потік інформації. Проте аналоговий сигнал, у порівнянні з цифровим, набагато більше схильний до впливу різних шумів та завад.

Однією з причин такого різновиду модемів у наш час є те, що не існує ніяких стандартів на конструкцію модемів. Це призводить до того, що в модемах одного виду одні і ті самі протоколи та методи можуть бути реалізовані по-різному. Проте майже усі модеми мають схожі схеми, до яких входять універсальний (PU), центральний сигнальний (DSP) та модемний процесори, адаптери портів каналного і DTE-DCE інтерфейсів, постійний (ПЗП, ROM), постійний енергонезалежний перепрограмувальний (ППЗП, EPROM) оперативний (ОЗП, RAM) запам'ятовуючі пристрої і схеми індикаторів стану модему (рис. 1.1).

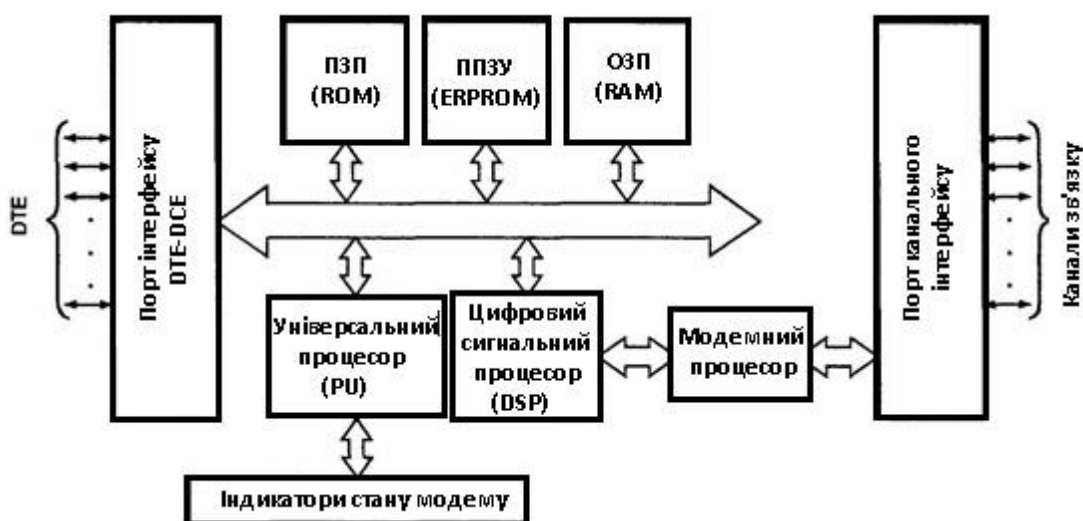


Рисунок 1.1 – Структурна схема сучасного модему

Універсальний процесор забезпечує управління взаємодією з DTE та схемами індикації станів модему. Також він відповідає за прийом та виконання команд, обробку даних, управління сигнальним процесором та буферизацію. Він виконує AT-команди (які потрібні для конфігурації та управління роботою модему), що надсилає DTE та керує режимами роботи інших складових частин.

Сигнальний процесор реалізує основні функції протоколів модуляції. Модемний процесор, у свою чергу, виконує модуляцію/демодуляцію та розділяє спектр частот.

DTE (data terminal equipment) – обладнання, яке формує чи приймає інформацію. DCE (data communication equipment) – це і є модеми. Порт

інтерфейсу DTE-DCE забезпечує взаємодію з DTE. Порт каналного інтерфейсу забезпечує узгодження електричних параметрів з використовуваним каналом зв'язку.

ПЗП зберігає програми для універсального та центрального сигнального процесорів. Крім цього, також у ПЗП зберігається мікропрограма управління – набір даних та команд, за допомогою яких здійснюється управління роботою модему. Програмний запам'ятовуючий пристрій може бути різних видів у залежності від кількості можливих операцій перепрограмування.

ППЗП забезпечує зберігання налаштувань модему у спеціальних файлах (профайлах) від час відключення. Як правило, існує основний та додатковий профайли, які використовуються для ініціалізації.

ОЗП використовується для тимчасового зберігання інформації, виконання обчислень процесорами (як універсальним, так і цифровим сигнальним). Також в ОЗП зберігається поточний набір налаштувань модему.

Модуляція – процес перетворення сигналу, що надходить з джерела інформації, у таку форму, яка дає можливість передавання по лінії або, кажучи іншими словами, це процес узгодження характеристик сигналу з характеристиками каналу зв'язку.

Модеми можна класифікувати за різними ознаками (рис. 1.2).

За способом передачі даних	За видом передавального середовища	За типом з'єднання	За швидкістю передачі даних
<ul style="list-style-type: none"> <li>•аналогові</li> <li>•цифрові</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•телефонні</li> <li>•кабельні</li> <li>•радіомодеми</li> <li>•світловодні</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•внутрішні</li> <li>•зовнішні</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•низької швидкості</li> <li>•високої швидкості</li> <li>•середньої швидкості</li> </ul>

Рисунок 1.2 – Класифікація модемів

За способом передачі даних:

- аналогові модеми - це модеми, які використовують аналогові сигнали для передачі даних. Вони були поширені в 1980-х і 1990-х роках, але зараз замінені цифровими модемами. Швидкість передачі даних аналогових модемів зазвичай обмежена і залежить від якості лінії (рис. 1.3);



Рисунок 1.3 – Приклад аналогового модему

- цифрові модеми - це модеми, які використовують цифрові сигнали для передачі даних. Вони швидші та надійніші, ніж аналогові модеми, і тому є більш популярними (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Приклад цифрового модему



За видом передавального середовища:

- телефонні модеми використовують телефонні лінії для передачі даних. Вони є найпоширенішим типом модемів і використовуються для підключення до Інтернету через телефонну лінію (рис. 1.5);



Рисунок 1.5 – Приклад модему для телефонної лінії

- кабельні модеми використовують кабельні мережі для передачі даних. Вони використовуються для підключення до Інтернету через кабельне телебачення (рис. 1.6);



Рисунок 1.6 – Приклад кабельного модему

- радіомодеми використовують радіохвилі для передачі даних. Вони використовуються для підключення до Інтернету в районах, де немає доступу до телефонних ліній або кабельних мереж (рис. 1.7);



Рисунок 1.7 – Приклад радіомодему

- світловодні модеми використовують світлові хвилі для передачі даних. Вони використовуються для підключення до Інтернету через оптоволоконні мережі (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Приклад світловодного модему

За типом протоколу:

- модеми для аналогових телефонних ліній використовують аналоговий сигнал для передачі даних. Вони є найпоширенішим типом модемів;
- модеми для цифрових телефонних ліній використовують цифровий сигнал для передачі даних. Вони забезпечують більш високу швидкість передачі даних, ніж модеми для аналогових телефонних ліній;
- модеми для кабельних мереж використовують протоколи, такі як DOCSIS або EuroDOCSIS, для передачі даних;
- радіомодеми використовують протоколи, такі як 802.11 або Bluetooth, для передачі даних;

- світловодні модеми використовують протоколи, такі як SONET або Ethernet, для передачі даних.

За швидкістю передачі даних:

- модеми низької швидкості;
- модеми середньої швидкості;
- модеми високої швидкості.

Модеми також можна класифікувати за типом застосування, для якого вони призначені.

Домашні модеми призначені для використання в домашніх умовах для доступу до Інтернету.

Бізнес-модеми призначені для використання в бізнесі для доступу до Інтернету та інших корпоративних мереж.

Мобільні модеми призначені для використання в мобільних пристроях, таких як смартфони та планшети, для доступу до Інтернету.

## **1.2 Типи підключення модемів**

За типом з'єднання:

- внутрішні модеми встановлюються всередині комп'ютера.
- зовнішні модеми підключаються до комп'ютера за допомогою кабелю.

Внутрішні модеми встановлюються всередині системного блоку комп'ютера. Для їхнього підключення використовується роз'єм PCI або PCIe. Вони не потребують окремого джерела живлення (рис. 1.9).

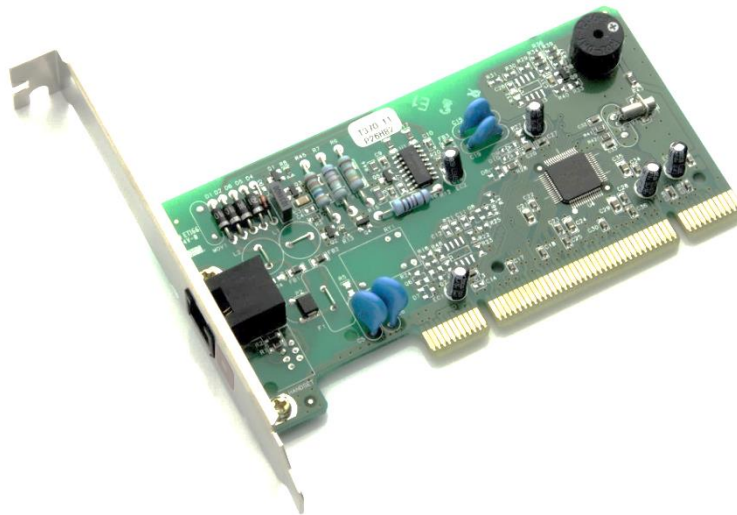


Рисунок 1.9 – Приклад внутрішнього модему

Зовнішні модеми підключаються до комп'ютера за допомогою кабелю. Найпоширеніші типи кабелів для підключення зовнішніх модемів (рис. 1.10):

- USB - забезпечує швидку передачу даних.
- Ethernet - забезпечує більш високу швидкість передачі даних, ніж USB.
- PS/2 - найповільніший тип кабелю для підключення зовнішніх модемів.



Рисунок 1.10 – Приклад зовнішнього модему

Безпроводові модеми не вимагають фізичного підключення до комп'ютера. Вони використовують радіоканал для передачі даних (рис. 1.11).



Рисунок 1.11 – Приклад безпроводового модему

Супутникові модеми використовують супутникові з'єднання для доступу до Інтернету. Це особливо корисно в областях, де інші типи підключення можуть бути недоступні.

### 1.3 Програмне забезпечення модемів

Програмне забезпечення модемів відіграє ключову роль у їхньому функціонуванні та може включати в себе різні компоненти та функції. До основних складових програмного забезпечення модемів можна віднести драйвери та внутрішнє програмне забезпечення.

Драйвери - це програмне забезпечення, яке дозволяє операційній системі взаємодіяти з модемом. Вони забезпечують правильне визнання та управління модемом, дозволяючи йому працювати з іншими частинами комп'ютера чи пристрою.

Модем може мати власне внутрішнє програмне забезпечення, яке відповідає за обробку сигналів, кодування та декодування даних, управління з'єднанням, а також за інші аспекти його функціоналу. Програмне забезпечення модема включає в себе реалізацію різних стандартів зв'язку залежно від типу модема та його призначення. Програмне забезпечення модема може включати інтерфейс для налаштування параметрів з'єднання, таких як швидкість передачі даних, тип

модуляції, обробка помилок тощо. Деякі модеми вбудовують функції безпеки та шифрування для захисту передаваних даних від несанкціонованого доступу. Можливість оновлення прошивки модема є важливою функцією, яка дозволяє виробникам виправляти помилки, покращувати функціонал та забезпечувати підтримку нових стандартів. Функції діагностики дозволяють виявляти та вирішувати проблеми. Деякі модеми підтримують функції віддаленого управління, що дозволяє адміністраторам віддалено налаштовувати та контролювати роботу модема

Програмне забезпечення модемів продовжує розвиватися, долучаючи нові функції та покращення, щоб відповідати зростаючим вимогам мереж та користувачів.

#### **1.4 Підтримка безпеки**

Модеми є важливим компонентом будь-якої мережі, оскільки вони дозволяють пристроям підключатися до Інтернету та інших мереж [3,4]. Однак модеми можуть бути вразливими до атак зловмисників, які можуть використовувати їх для отримання доступу до конфіденційної інформації або для зараження мережі шкідливим програмним забезпеченням.

Щоб захистити модеми від атак, виробники модемів впроваджують різні функції безпеки. До найпоширеніших функцій безпеки модемів належать:

- захист паролем. Це найважливіша функція безпеки модему, оскільки вона дозволяє користувачам захистити свій модем від несанкціонованого доступу.

- аутентифікація користувачів. Ця функція безпеки дозволяє модему перевіряти, чи є користувач, який намагається отримати доступ до нього, авторизованим.

- шифрування даних. Ця функція безпеки дозволяє шифрувати дані, які передаються через модем, що робить їх нечитабельними для зловмисників, які можуть перехопити їх. Наприклад, WPA3 для захисту Wi-Fi-мережі.

- фільтрація пакетів. Ця функція безпеки дозволяє модему блокувати певні типи пакетів, наприклад, пакети від невідомих джерел.

Крім того, користувачі можуть також вжити додаткових заходів для захисту свого модему, таких як:

- встановлення останніх оновлень безпеки. Виробники модемів регулярно випускають оновлення безпеки, які закривають відомі уразливості.

- використання брандмауера. Брандмауер може допомогти захистити модем від атак з Інтернету. Деякі модеми мають вбудовані брандмауери.

- зміна стандартних паролів. Стандартні паролі, які використовуються на модемах, часто є загальновідомими. Зміна стандартних паролів на унікальні паролі, допоможе захистити модем від несанкціонованого доступу.

Виконання цих заходів допоможе захистити модем від атак зловмисників і зберегти мережу в безпеці.

## **1.5 Висновки до розділу 1**

Класифікація модемів є важливим аспектом в області телекомунікацій і забезпечення доступу до Інтернету. Класифікація модемів відображає різноманітність технологій, які використовуються для забезпечення доступу до Інтернету та передачі даних. Вона включає в себе традиційні технології, такі як DSL та кабельні модеми, а також новіші, такі як супутникові та мобільні модеми. Різні типи модемів можуть надавати різні швидкості передачі даних. Мобільні модеми, які використовують мобільні мережі, надають велику мобільність і гнучкість, дозволяючи користувачам отримувати доступ до Інтернету в рухомому положенні. Різні типи модемів можуть мати різний рівень безпеки. Наприклад, модеми з мобільним з'єднанням можуть використовувати шифрування для захисту передаваних даних. Тип підключення модема може бути важливим фактором в регіонах з різним рівнем розвитку інфраструктури. Наприклад, супутникові модеми можуть бути корисними в регіонах, де немає доступу до кабельних або DSL-мереж, що є дуже актуальним сьогодні для України.

## 2 ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ МОДЕМІВ

### 2.1 Підвищення надійності модемів

Підвищення надійності модемів може включати в себе різні стратегії та методи для забезпечення стійкості роботи та максимально можливого часу доступу до мережі [5,6].

Для цієї мети можна використовувати (рис 2.1):

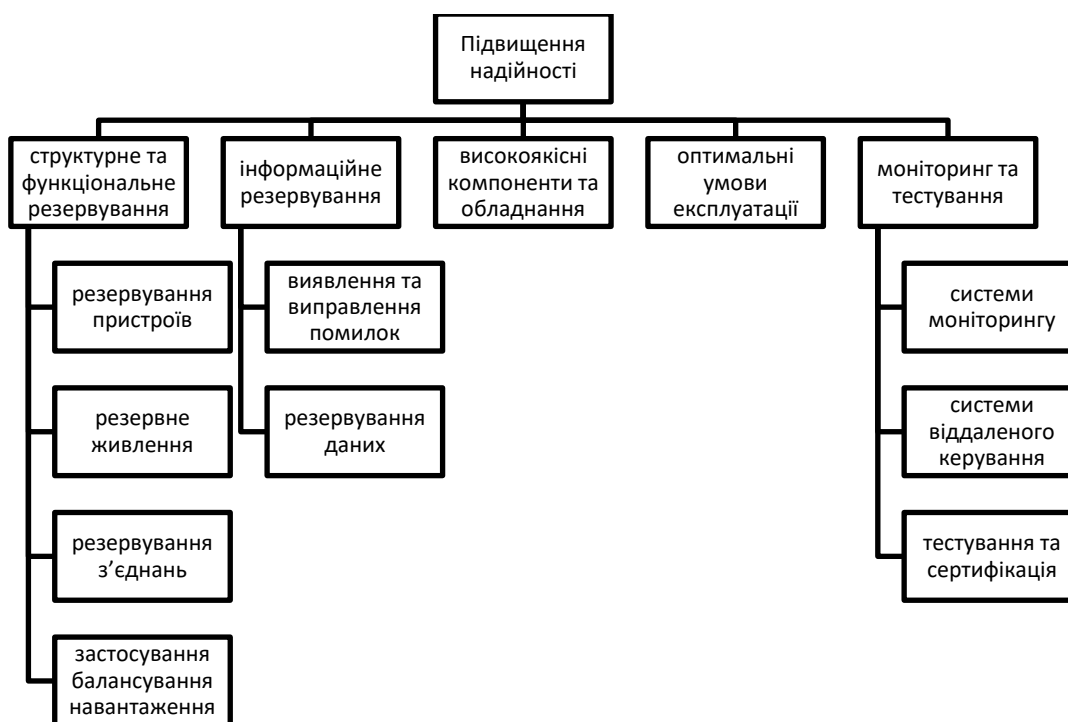


Рисунок 2.1 – Методи підвищення надійності

а) структурне та функціональне резервування:

1) резервування пристроїв. Використання двох або більше модемів для створення резервуару послуг. Якщо один модем виходить з ладу, інший може автоматично взяти на себе трафік. Це дозволяє знизити вплив відмови на доступність;



2) резервне живлення. Встановлення резервного джерела живлення, такого як акумулятор або генератор, для забезпечення живлення модему у випадку відключення основного джерела енергії;

3) резервування з'єднань. Конфігурування резервних з'єднань для модема, таких як додаткові інтерфейси або додаткові шляхи передачі даних;

4) застосування балансування навантаження. Використання технологій балансування навантаження для рівномірного розподілу трафіку між різними модемами. Це дозволяє запобігати перевантаженню одного конкретного модема;

б) інформаційне резервування:

1) виявлення та виправлення помилок (FEC). Використання методів для виявлення та автоматичної корекції передавальних помилок, що дозволяє зберегти дані;

2) резервування даних, створення копії даних. Резервні копії даних можна зберігати на локальних або віддалених носіях.

в) використання високоякісних компонентів та обладнання для підвищення тривалості служби та стабільності;

г) забезпечення оптимальних умов експлуатації. Розміщення модемів у місцях з стабільним електропостачанням, правильними температурними умовами та іншими факторами, які можуть впливати на їхню працездатність;

д) моніторинг та тестування:

1) системи моніторингу та віддаленого керування. Впровадження систем моніторингу та віддаленого керування, які дозволяють відслідковувати стан модемів та вживати заходів відновлення віддалено;

2) тестування та сертифікація. Проходження відповідних тестів та отримання сертифікацій для підтвердження відповідності стандартам та нормам безпеки.

Ці методи можна використовувати окремо або в комбінації для досягнення більшої надійності модемів та мережі в цілому.

## 2.2 Структурне та функціональне резервування

Резервування модемів - це процес забезпечення наявності резервного модему, який може взяти на себе функції основного модему у разі його виходу з ладу.

До переваг резервування модемів можна віднести:

- забезпечення безперервності роботи мережі. Резервування модемів дозволяє забезпечити безперервність роботи мережі навіть у разі виходу основного модему з ладу. Це важливо для критичних мереж, таких як мережі підприємств або організацій.

- запобігання втраті даних. Резервування модемів допомагає запобігти втраті даних, які можуть бути втрачені у разі виходу основного модему з ладу.

- зниження витрат. Резервування модемів може допомогти знизити витрати на ремонт або заміну основного модему.

Резервування модемів є важливим фактором, який слід враховувати при проектуванні та експлуатації будь-якої мережі.

Існує кілька різних типів структурного резервування модемів, наприклад (рис 2.2):

- гаряче резервування - це тип резервування, при якому резервний модем постійно підключений до мережі і готовий до використання. У разі виходу з ладу основного модему резервний модем автоматично бере на себе його функції. Використовується, зазвичай, для критичних мереж.

- холодне резервування - це тип резервування, при якому резервний модем не підключений до мережі до тих пір, поки не вийде з ладу основний модем. У цьому випадку користувач або адміністратор мережі повинен вручну підключити резервний модем до мережі. Використовується, зазвичай, для некритичних домашніх мереж.

- почергове резервування - це тип резервування, при якому два модеми чергуються в роботі. У цьому випадку один модем працює, а інший перебуває в режимі резерву. У разі виходу з ладу основного модему резервний модем автоматично бере на себе його функції.

- масове резервування - це тип резервування, при якому кілька модемів працюють паралельно. У цьому випадку у разі виходу з ладу одного модему інші модеми продовжують працювати, забезпечуючи безперервність роботи мережі. Використовується, зазвичай, для мереж з великою пропускнуою здатністю, таких як мережі для передачі відео або звуку.

Структурне резервування	Функціональне резервування
<ul style="list-style-type: none"> <li>• гаряче резервування</li> <li>• холодне резервування</li> <li>• почергове резервування</li> <li>• масове резервування</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• резервування за допомогою перемикання</li> <li>• резервування за допомогою балансування навантаження</li> <li>• резервування за допомогою маршрутизації</li> </ul>

Рисунок 2.2 – Методи структурного та функціонального резервування

Функціональне резервування призначене для підвищення рівня функціональної надійності. При використанні функціонального резервування ефективність роботи виробу в основному та резервному режимах роботи, як правило, суттєво різняться. Тому усередненні показники надійності (середній наробіток на відмову, середній коефіцієнт готовності, ймовірність безвідмовної роботи) стають малоінформативним та недостатньо придатним для використання. Найбільш прийнятні показники функціональної надійності: ймовірність виконання даної функції, середній час виконання функції, коефіцієнт готовності для виконання даної функції [2].

Функціональне резервування модемів - це тип резервування, при якому два модеми мають однакові функції та можуть брати на себе функції один одного у разі виходу одного з них з ладу.

Існує кілька різних способів реалізації функціонального резервування модемів.

Резервування за допомогою перемикання. У цьому випадку обидва модеми підключені до мережі, але тільки один з них працює. У разі виходу з ладу основного модему резервний модем автоматично бере на себе його функції.

Резервування за допомогою балансування навантаження. У цьому випадку обидва модеми працюють паралельно, розподіляючи навантаження між собою. У разі виходу з ладу одного з модемів навантаження перерозподіляється на інший модем.

Резервування за допомогою маршрутизації. У цьому випадку обидва модеми підключені до різних маршрутизаторів. У разі виходу з ладу одного з маршрутизаторів пристрої, які були підключені до цього маршрутизатора, будуть перенаправлені на інший маршрутизатор.

Системи резервування можуть бути налаштовані для автоматичного виявлення відмов і автоматичного переключення на резервний модем без втручання оператора. Резервування може сприяти збереженню безпеки та можливості відновлення в разі виникнення проблем з основним модемом. Використання резервних модемів також дозволяє виконувати технічне обслуговування основного обладнання без впливу на роботу мережі.

Сучасний роутер дозволяє працювати в кількох режимах (рис. 2. 3).

Режим підключення після відмови: цей режим конфігурації дозволяє нам мати основне підключення до глобальної мережі, яке буде працювати безперервно, і лише якщо воно «впаде» на кілька секунд або хвилин, тоді почне працювати резервне підключення. Коли основне підключення до інтернету відновлюється, трафік знову почне йти через основне підключення WAN, а вторинне підключення перейде в режим очікування.

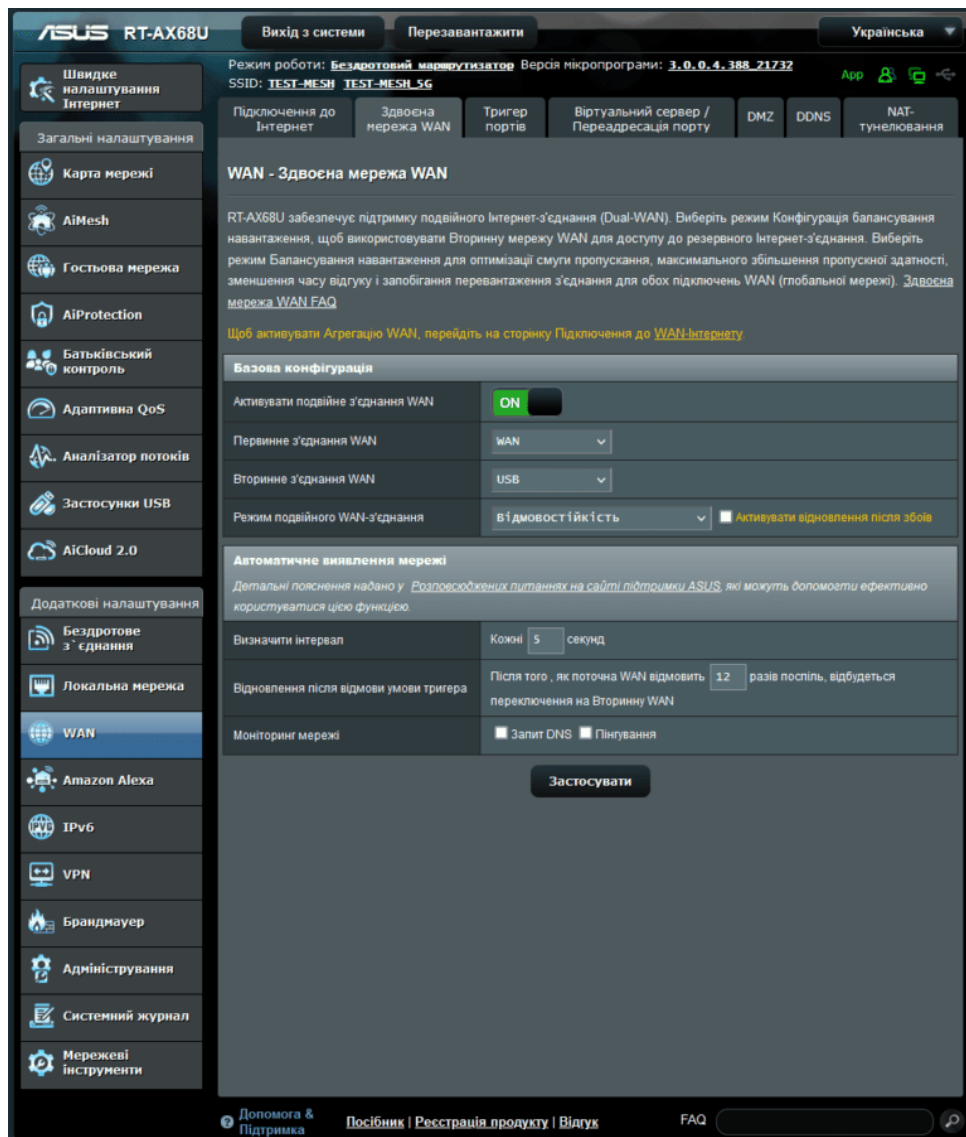


Рисунок 2. 3 – Приклад налаштування роутера із мобільним модемом [21]

Режим балансування навантаження: цей режим конфігурації дозволяє нам мати два інтернет-з'єднання, що працюють одночасно, хоча можна надати одному з варіантів підключення більший пріоритет над іншим.

### 2.3 Інформаційне резервування

Інформаційне резервування - це резервування з використанням надлишковості інформації. Прикладами інформаційного резервування є: передача одного й того самого повідомлення по каналах зв'язку, застосування при передаванні інформації по каналам зв'язку різних кодів, що виявляють та

виправляють помилки, які з'являються в результаті відмов апаратури та впливів завад; використання надлишкових інформаційних символів при обробці, передачі та відображенні інформації (рис. 2.4). Надлишок інформації дозволяє в тій чи іншій мірі компенсувати викривлення інформації, що передається, або усунути їх [2].

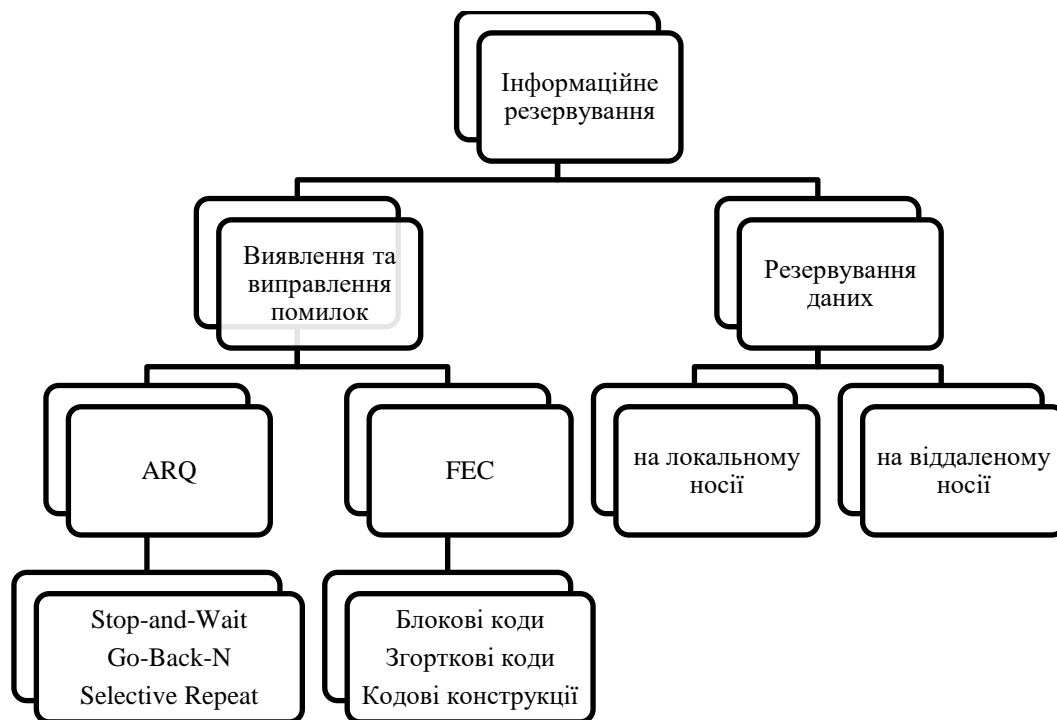


Рисунок 2.4 – Методи інформаційного резервування

Кодування – операція ідентифікації символів або груп символів з одного коду символами або групами символів в інший код. Виникає необхідність кодування. Перш за все, від вимоги адаптувати форму повідомлення до даного каналу зв'язку або до будь-якого іншого пристрою, призначеного для передачі чи зберігання інформації.

Існує два основних типи методів виявлення та виправлення помилок:

- методи з прямою корекцією помилок (FEC) - це методи, які використовують надлишковість інформації для виправлення помилок. FEC буде розглянуто докладно у наступному розділі.

- методи з непрямою корекцією помилок (ARQ) - це методи, які використовують обмін інформацією між відправником і приймачем для виправлення помилок.

ARQ з запитом повтору (Stop-and-Wait ARQ) - це найпростіший тип методу ARQ. У цьому методі відправник передає сигнал, а приймач повідомляє відправнику, чи був сигнал отриманий без помилок. Якщо сигнал був отриманий з помилками, відправник передає сигнал повторно.

ARQ з множинним запитом повтору (Go-Back-N ARQ) - це більш ефективний тип методу ARQ, ніж Stop-and-Wait ARQ. У цьому методі відправник передає кілька сигналів одночасно. Приймач повідомляє відправнику про помилки, які були виявлені в будь-якому з сигналів. Виконавши ці зміни, відправник пересилає тільки ті сигнали, які містять помилки.

ARQ з просуванням вперед (Selective Repeat ARQ) - це ще більш ефективний тип методу ARQ, ніж Go-Back-N ARQ. У цьому методі відправник передає кілька сигналів одночасно. Приймач повідомляє відправнику про помилки, які були виявлені в будь-якому з сигналів. Виконавши ці зміни, відправник пересилає тільки ті сигнали, які містять помилки, які не можуть бути виправлені за допомогою надлишкової інформації.

Щодо резервування даних, то існує кілька різних способів створення копії даних.

Резервування даних на локальному носії - це найпростіший спосіб резервування даних. У цьому випадку резервна копія даних зберігається на локальному носії, такому як жорсткий диск або SSD.

Резервування даних на віддаленому носії - це більш надійний спосіб резервування даних. У цьому випадку резервна копія даних зберігається на віддаленому носії, такому як зовнішній жорсткий диск або хмарне сховище.

Резервування на місці є більш простим і дешевшим, ніж резервування на віддаленому місці. Однак резервування на місці не забезпечує повної безпеки даних, оскільки воно піддається тим же самим ризикам, що й оригінальні дані.

Резервування на віддаленому місці забезпечує більшу безпеку даних, оскільки воно захищає дані від локальних катастроф, таких як пожежа або крадіжка. Однак резервування на віддаленому місці може бути більш дорогим і складним у реалізації.

## 2.4 Виграш резервування

При аналізі надійності резервованих пристроїв на етапі проектування приходиться порівнювати різні схемні рішення. У цьому випадку за критерій якості резервування приймається виграш надійності.

Виграшем надійності називається відношення кількісної характеристики надійності резервованого пристрою до тієї ж кількісної характеристики нерезервованого пристрою або пристрою із іншим видом резервування.

Найчастіше використовуються наступні критерії якості резервування [2]:

- виграш надійності протягом часу  $t$  за ймовірністю відмов:

$$G_q(t) = \frac{Q_c(t)}{Q_o(t)} \quad (2.1)$$

- виграш надійності протягом часу  $t$  за ймовірністю безвідмовної роботи:

$$G_p(t) = \frac{P_c(t)}{P_o(t)} \quad (2.2)$$

- виграш надійності за середнім часом безвідмовної роботи:

$$G_T(t) = \frac{T_c(t)}{T_o(t)} \quad (2.3)$$

Для оцінки та порівняння ефективності інформаційного резервування (завадостійкого кодування) будемо використовувати енергетичний виграш кодування (ЕВК). Енергетичний виграш від застосування кодування дорівнює



різниці значень відношення сигнал/шум, необхідних для забезпечення заданої ймовірності помилки при передаванні інформації при відсутності та при використуванні кодування.

$$\text{ЕВК} = h_0^2 - h_k^2 \quad (2.4)$$

де  $h_0^2$  – відношення сигнал-шум без завадостійкого кодування, дБ;

$h_k^2$  – відношення сигнал-шум з завадостійким кодуванням, дБ.

## 2.5 Моніторинг та тестування

Системи моніторингу та віддаленого керування модемів (NMS) - це програмне забезпечення, яке використовується для відстеження стану модемів у мережі. NMS може використовуватися для виявлення проблем з модемами, таких як нестабільні з'єднання або перегрів. NMS також може використовуватися для віддаленого керування модемами, наприклад, для зміни налаштувань або перезавантаження модемів.

NMS виконують наступні функції:

- спостереження за станом модемів: NMS може відстежувати стан модемів, такі як рівень сигналу, температура та використання ресурсів.

- детекція проблем: NMS може виявляти проблеми з модемами, такі як нестабільні з'єднання або перегрів.

- віддалене керування модемами: NMS може використовуватися для віддаленого керування модемами, наприклад, для зміни налаштувань або перезавантаження модемів.

NMS можуть використовуватися для підвищення надійності та продуктивності мережі. Вони можуть допомогти організаціям виявляти проблеми з модемами до того, як вони призведуть до перерв у роботі мережі, швидко усунути проблеми з модемами, щоб мінімізувати перерви в роботі мережі, оптимізувати налаштування модемів для підвищення продуктивності мережі.

Існує багато різних NMS на ринку. При виборі NMS слід враховувати такі фактори, як функції, необхідні організації, розмір мережі, яку необхідно моніторити, бюджет організації.

Наведемо приклади популярних NMS:

- PRTG Network Monitor (рис. 2.1)

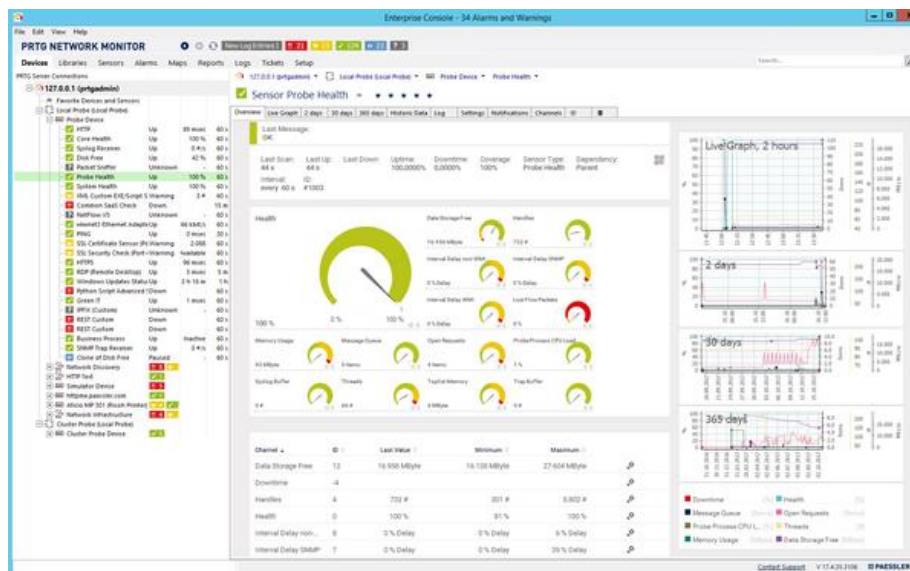


Рисунок 2.1 – Приклад використання PRTG Network Monitor [17]

- Nagios XI (рис. 2.2)

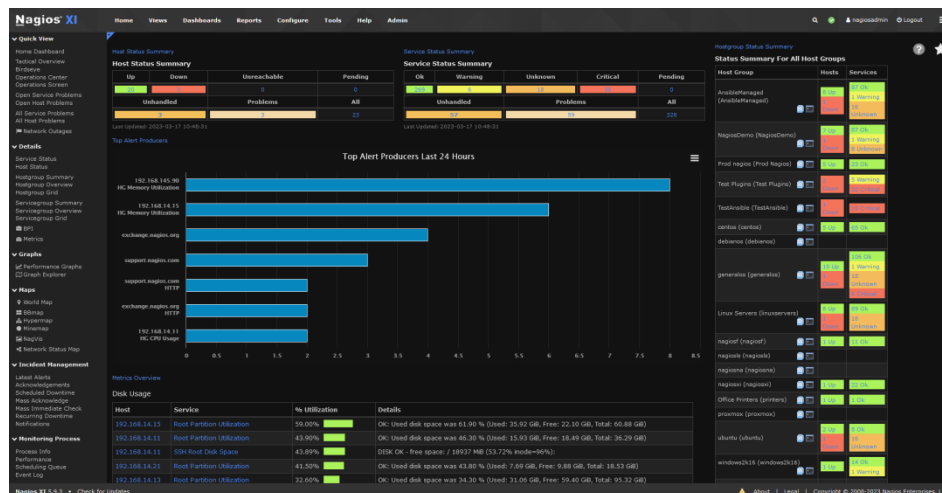


Рисунок 2.2 – Приклад використання Nagios XI [18]

- Zabbix (рис. 2.3)

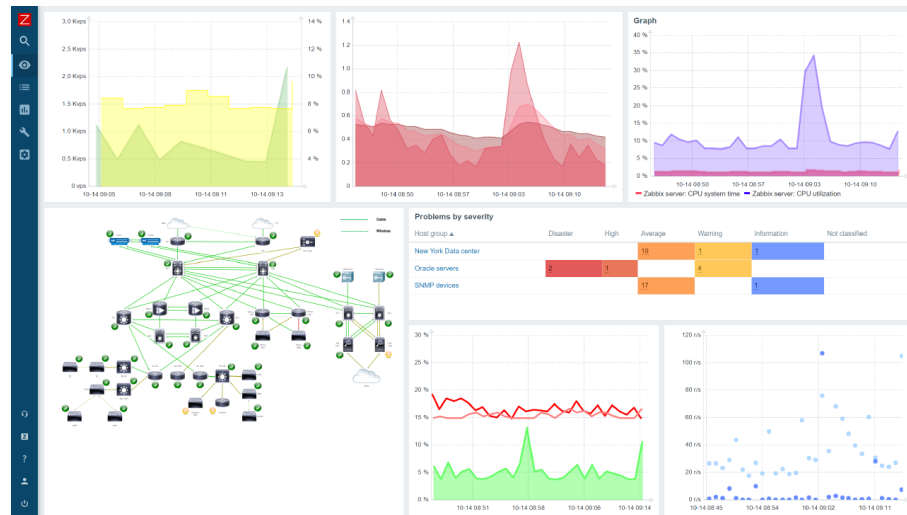


Рисунок 2.3 – Приклад використання Zabbix [19]

– SolarWinds Network Performance Monitor

Тестування модемів є важливим процесом, який допомагає гарантувати, що модеми відповідають певним вимогам продуктивності та надійності. Тестування модемів може виконуватися виробниками, постачальниками або користувачами.

Існує два основних типи тестування модемів:

- функціональне тестування: цей тип тестування перевіряє, чи модем може виконувати свої основні функції, такі як передача даних і голосові дзвінки;
- тестування на несправності: цей тип тестування перевіряє, чи модем може витримати певні несправності, такі як перепади напруги або завади.

Сертифікація модемів - це процес, за допомогою якого незалежний орган підтверджує, що модем відповідає певним стандартам або вимогам. Сертифікація модемів може бути важливою для організацій, які хочуть гарантувати, що їхні модеми відповідають певним стандартам продуктивності та надійності.

Сертифіковані модеми часто мають напис із символом сертифікації. Цей символ може допомогти організаціям швидко визначити, чи модем сертифікований (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – Приклад сертифікату експертизи та відповідний символ [20]

Користь від тестування та сертифікації модемів беззаперечна. Тестування та сертифікація модемів можуть принести кілька переваг.

Гарантія якості: тестування та сертифікація модемів допомагають гарантувати, що модеми відповідають певним вимогам продуктивності та надійності.

Зменшення ризиків: тестування та сертифікація модемів можуть допомогти зменшити ризик проблем з модемами, таких як нестабільні з'єднання або перегрів.

Підвищена продуктивність: тестування та сертифікація модемів можуть допомогти підвищити продуктивність модемів, виявляючи та усуваючи проблеми з продуктивністю.

## 2.6 Висновки до розділу 2

Резервування є ефективним способом підвищення надійності модемів. Воно може допомогти запобігти втраті даних, перерв у роботі модемів та іншим

негативним наслідком виходу модему з ладу. Загалом резервування модемів є важливим елементом стратегії забезпечення надійності та готовності мережі до різних випадків відмов та проблем.

Серед методів резервування слід виділити структурне, функціональне та інформаційне резервування.

В наступному розділі проведемо порівняння методів структурного, функціонального та інформаційного резервування за допомогою виграшу надійності та енергетичного виграшу кодування.

## 3 АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ МОДЕМІВ

### 3.1 Розрахунок завадостійкості модемів без кодування

У даній роботі розрахунки будуть проведені для видів модуляції ФМ-4, КАМ-16, КАМ-64, КАМ-256.

Фазова модуляція (ФМ-4, QPSK, quadrature phase shift keying) – це вид модуляції, в якому при переході від одного символу до іншого і навпаки фаза синусоїдальної несучої змінюється на  $180^\circ$ . При модулюванні сигнал набуває дуже широкий спектр, оскільки його фаза різко змінюється, тому цей вид модуляції знаходить широке застосування для забезпечення завадостійкого зв'язку у високошвидкісних модемах. У ФМ-4 використовується сигнальне сузір'я з чотирьох точок, рівновіддалених одна від одної та розміщених на окружності, тому на один символ припадає по два біти.

Ймовірність помилки на біт для ФМ-4 при  $M \geq 4$  можна знайти з формули (3.1):

$$p = \frac{2}{\log_2 M} Q\left(\sin \frac{\pi}{M} \sqrt{2 \log_2 M} \cdot h_b\right) \quad (3.1)$$

де  $M$  – кількість каналних символів, що передаються,

$h_b^2$  – відношення сигнал/шум,

$Q(z)$  – гаусова функція ймовірності помилки.

Квадратурна амплітудна модуляція (КАМ, QAM, Quadrature Amplitude Modulation) – різновид амплітудної модуляції сигналу, яка представляє собою суму двох несівних коливань однієї частоти, проте зміщених по фазі відносно один одного на  $90^\circ$ . Змінюється не лише фаза, а і амплітуда сигналу, що дозволяє збільшити кількість інформації, яка передається. З іншого боку, більша кількість рівнів амплітуди сигналу розташовуються близько один до одного, що призводить

до підвищеної чутливості системи до шуму, а отже, зростають вимоги до параметру SNR (Signal Noise Ratio – відношення сигнал/шум).

При використанні КАМ з довільним числом позицій (КАМ- $M$ ,  $M \geq 16$ ) ймовірність бітової помилки можна знайти із формули (3.2) [7]:

$$p = \frac{4}{\log_2 M} \cdot Q\left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M}{M-1}} \cdot h_b\right) \quad (3.2)$$

Таблиця 3.1 - Розрахункові формули ймовірності помилки на біт при використанні різноманітних видів модуляції

Вид модуляції	Ймовірність помилки
ФМ – $M$ ( $M \geq 4$ )	$p = \frac{2}{\log_2 M} Q\left(\sqrt{2 \log_2 M} \cdot \sin \frac{\pi}{M} \cdot h_b\right)$
КАМ – $M$	$p = \frac{4(\sqrt{M} - 1)}{\log_2 M \sqrt{M}} \cdot Q\left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M}{M-1}} \cdot h_b\right)$
КАМ – $M$ ( $M \geq 16$ )	$p = \frac{4}{\log_2 M} \cdot Q\left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M}{M-1}} \cdot h_b\right)$

Метою розрахунків було виявлення залежностей ймовірностей бітової помилки від відношення сигнал/шум при використанні різних видів коректувальних кодів, модуляцій та розрахунок енергетичного виграшу кодування (при використанні модуляції КАМ–64). Після проведення розрахунку були отримані графіки (рис. 3.1).

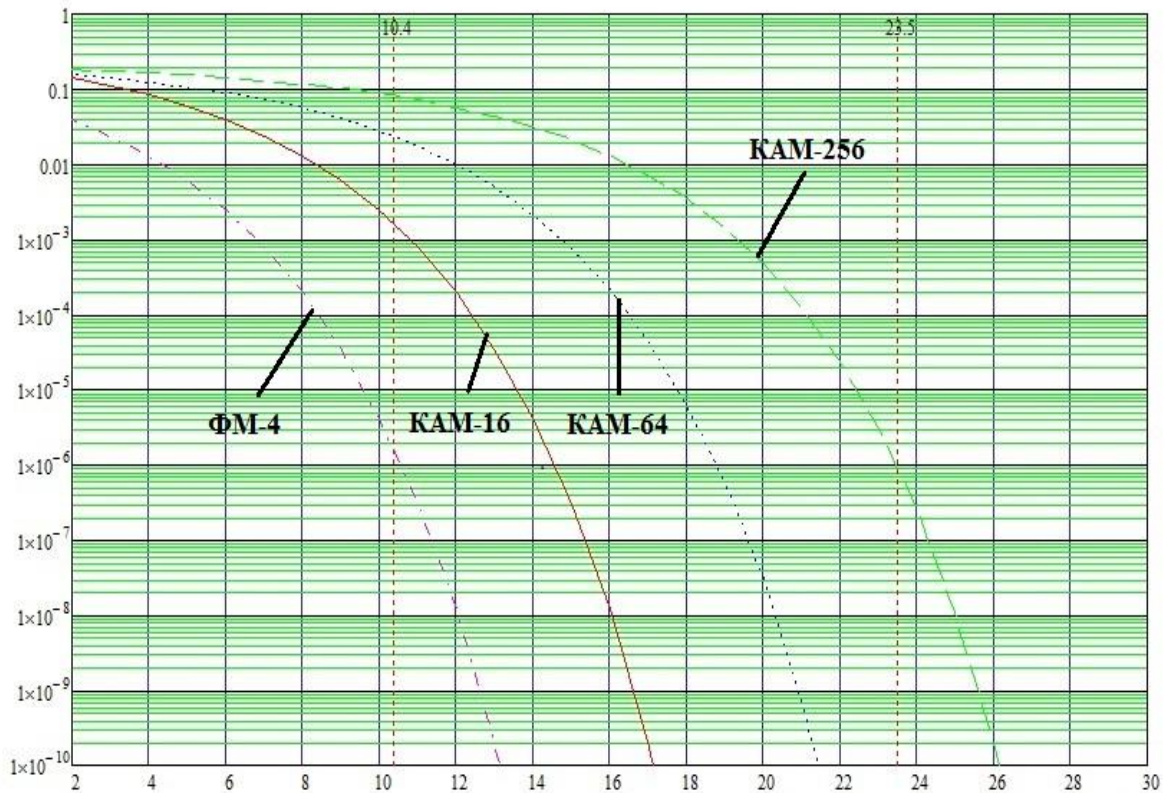


Рисунок 3.1 – Графік залежності ймовірностей помилки біту від відношення сигнал/шум при використанні різних видів модуляції

Як можна побачити з рисунку 3.1, фазова модуляція дозволяє забезпечити необхідну ймовірність бітової помилки при значенні  $h_0^2 = 10,4$  дБ, що дозволяє зменшити потужність передавача. Найвищий показник відношення сигнал/шум для досягнення потрібної ймовірності помилки забезпечує вид модуляції КАМ-256 ( $h_0^2 = 10,4$  дБ). Використання цього виду модуляції дозволяє суттєво зменшити необхідну для передавання смугу частот, проте разом із цим ймовірність бітової помилки на виході демодулятора зростає.

### 3.2 Розрахунок завадостійкості модемів з кодуванням

Застосування кодів дозволяє підвищувати дальність зв'язку та ефективність використовуваних каналів, знижувати потужність передавача, економити смугу частот, підвищувати надійність зберігання та швидкість передачі даних, зменшувати розміри антен та збільшувати щільність запису. В даній роботі



розглянуті такі види коректувальних кодів: згортковий код, турбо-код, каскадний код (РС + Згортковий), сигнально-кодова конструкція (КАМ + м'яке рішення БЧХ), LDPC, фонтанний код та полярний код.

БЧХ - Коди Боуза - Чоудхурі - Хоквінгема (БЧХ-коди, BCH codes) - в теорії кодування це широкий клас циклічних кодів, що застосовуються для захисту інформації від помилок. Відрізняється можливістю побудови коду із заздалегідь визначеними коректувальними властивостями, а саме, мінімальною кодовою відстанню. При використанні коректувального коду для БЧХ [7]:

$$p_{\text{дек}} \approx \frac{d_{\text{min}}}{n} \sum_{q=q_{\text{вип}}+1}^n C_n^q p^q (1-p)^{n-q} \quad (3.3)$$

де  $p_{\text{дек}}$  - ймовірність помилки біта на виході декодера,

$d_{\text{min}}$  - мінімальна кодова відстань,  $d_{\text{min}} = 2q_{\text{вип}} + 1$ .

$n$  - довжина кодового слова,

$k$  - кількість інформаційних біт в блоці,

$m$  - база коду,  $m \geq \log_2(n + 1)$  для всіх кодів крім РС,

$q_{\text{вип}}$  - кількість виправляємих помилок,

$p$  - ймовірність помилки біта на виході демодулятора з урахуванням швидкості коду,

$R_{\text{код}}$  - швидкість коду, показує яку частину в кодовому слові становлять інформаційні біти,  $R_{\text{код}} = k / n$ .

Коди Ріда-Соломона (Reed-Solomon codes) - недвійкові циклічні коди, що дозволяють виправляти помилки в блоках даних. Елементами кодового вектора є не біти, а групи бітів (блоки). Дуже поширені коди Ріда - Соломона, що працюють з байтами [11,12]. Цей алгоритм кодування використовується при передачі даних по мережах WiMAX.

$$p_{\text{дек}} \approx \frac{d_{\text{min}}}{n} \sum_{q=q_{\text{вип}}+1}^n C_n^q p^q (1-p)^{n-q} \quad (3.4)$$

де  $m$  - база коду, для РС  $m = 2$ .

Згорткові коди утворюють підклас неперервних кодів. Назва цього виду коду походить від того, що результат кодування на виході кодеру є згорткою (результат операції, внаслідок якої дві функції породжують третю) кодуємої інформаційної послідовності з імпульсною реакцією кодеру [13]. В телекомунікаціях згорткове кодування - вид коректувального кодування, сутність якого полягає у введенні надмірності в передане повідомлення, тобто у перетворенні  $m$ -бітної вхідної послідовності в  $n$ -бітну вихідну ( $n \geq m$ ) [7].

$$p_{\text{дек}} = \omega_{df} \cdot Q \left( \sqrt{2d_f R_{\text{код}} h_0^2} \right) \quad (3.5)$$

де  $\omega_{df}$  - кількість помилкових шляхів з вагою  $d_f$ ,

$d_f$  - вільна віддаль у метриці Хеммінга,

$h_0^2$  - відношення сигнал/шум.

Каскадні коди будуються за принципом поетапного застосування двох і більше процедур кодування до послідовності передавальних символів. Найбільш поширеною є схема з двома рівнями кодування.

Турбо-код - паралельний каскадний блоковий систематичний код, здатний виправляти помилки, що виникають при передачі цифрової інформації по каналу зв'язку з шумами. Синонімом турбо-коду є відомий в теорії кодування термін - каскадний код (concatenated code) (запропонований Д. Форні в 1966 році) [14].

Турбо-код складається з каскаду паралельно з'єднаних систематичних кодів. Ці складові називаються компонентними кодами. Як компонентні коди можуть використовуватися згорткові коди, коди Хеммінга, Ріда - Соломона, Боуза - Чоудхурі - Хоквінгема та інші. Залежно від вибору компонентного коду турбо-коди діляться на згорткові турбо-коди (Turbo Convolutional Codes, TCC) та блокові турбо-коди добутку (Turbo Product Codes, TPC) [15].

$$p_{\text{дек}} = f(d_f R_{\text{код}} h_0^2) \sum_{d_f \leq d} \omega_{df} (e^{-R_{\text{код}} h_0^2}) \quad (3.6)$$

Обрана певним чином комбінація конкретної КАМ і завадостійкого коду у вітчизняній технічній літературі носить назву сигнально-кодової конструкції (СКК), яка дозволяє підвищити завадозахисну передачу інформації одночасно із зниженням вимог до відношення сигнал/шум на 3-6 дБ. Це пояснюється збільшенням числа сигнальних точок за рахунок додавання до інформаційних біт одного надлишкового, утвореного шляхом згорткового кодування. Розширений таким чином блок бітів піддається все тій же КАМ [7].

$$p = \frac{4(\sqrt{M}-1)}{n\sqrt{M}} \cdot Q \left( \sqrt{\frac{3n}{M-1}} \cdot h_6 \right) \quad (3.7)$$

та м'яке рішення для коду Ріда-Соломона [16]:

$$p_{\text{дек}} \leq \frac{1}{2} (2^K - 1) \cdot Q \left( \sqrt{2 \cdot h_6^2 \cdot R_{\text{код}} \cdot d_{\text{min}}} \right) \quad (3.8)$$

Код з малою щільністю перевірок на парність (LDPC-код від Low-density parity-check code, LDPC-code) - код, який використовується при передачі інформації через канал зв'язку, окремий випадок блокового лінійного коду з перевіркою парності. LDPC коди увібрали в себе переваги інших блокових кодів, не маючи їх недоліків, що забезпечує даними кодами стійкість, близьку до кордону Шеннона. Згідно Галлагера,  $(n, j, k)$  LDPC код - це код з довжиною блоку  $n$ , де кожна колонка містить однакову невелику кількість одиниць  $j$  і кожен рядок містить однакову невелику кількість одиниць  $k$  [10].

$$p_{i+1} = p_0 \cdot \binom{j-1}{\frac{j-1}{2}} \cdot (k-1)^{\frac{j-1}{2}} \cdot p_i^{\frac{j-1}{2}}, \text{ якщо } \text{mod}(j, 2) = 1; \quad (3.9)$$

$$p_{i+1} = p_0 \cdot \binom{j-1}{\frac{j}{2}} \cdot (k-1)^{\frac{j}{2}} \cdot p_i^{\frac{j}{2}}, \text{ якщо } \text{mod}(j, 2) = 0.$$

У теорії кодування фонтані коди (також відомі як коди стирання) є класом кодів стирання з властивістю, яка полягає у тому, що потенційно безмежна послідовність символів кодування може бути згенерована з заданого набору вихідних символів таким чином, що оригінальні вихідні символи в ідеалі можуть бути відновлені з будь-якої підмножини кодуєчих символів розміром, рівним або лише трохи більшим, ніж кількість вихідних символів. Термін "фонтан" відноситься до того, що ці коди не мають фіксованої швидкості кодування. Коди стирання використовуються в додатках для зберігання даних завдяки великій економії на кількості одиниць зберігання для заданого рівня надмірності та надійності. Вимоги дизайну коду стирання для зберігання даних, особливо для розподілених додатків зберігання, можуть бути досить різними щодо сценаріїв передачі даних або передачі даних. Однією з вимог кодування систем зберігання даних є систематична форма, тобто вихідні символи повідомлення є частиною кодованих символів. Систематична форма дозволяє зчитувати символи повідомлення без декодування з блоку зберігання. Крім того, оскільки пропускну здатність і навантаження зв'язку між вузлами зберігання можуть бути вузьким місцем, коди, що дозволяють мінімальну комунікацію, є дуже корисними, особливо, коли вузол виходить з ладу і необхідна реконструкція системи для досягнення початкового рівня надмірності. У цьому відношенні очікується, що коди фонтанів дозволять ефективний процес ремонту в разі невдачі: коли один кодований символ втрачається, він не повинен вимагати занадто багато зв'язку та обчислення серед інших закодованих символів, щоб поновити втрачений символ. Фактично, затримка ремонту іноді може бути більш важливою, ніж економія місця для зберігання.

Вченим Ердалом Арікном у 2008 році була запропонована концепція полярних кодів, яка поєднує у собі високий показник завадозахисту інформації при високій швидкості передавання та обчислювальну простоту. Полярні коди діють на блоки символів (бітів), і тому фактично належать до підкласу блокових кодів. Побудова цих кодів дотримується нестандартного підходу у порівнянні з

більш традиційними турбо-кодами. Особливість полярних кодів полягає у «розумних» маніпуляціях бітами. Оригінальна методика у поєднанні з розділенням каналів і послідовним декодуванням призводить до перетворення блоку бітів між кодером і декодером у полярний бітовий потік на приймачі. Внаслідок цього складність реалізації (особливо декодування) значно менша у порівнянні з турбо-кодами.

Таблиця 3.2 – Розрахункові формули ймовірності помилки на біт при використанні завадостійкого кодування

Код	Ймовірність помилки на біт
БЧХ	$p_{\text{дек}} \approx \frac{d_{\min}}{n} \sum_{q=q_{\text{вип}}+1}^n C_n^q p^q (1-p)^{n-q}$
РС	$p_{\text{дек}} \approx \frac{d_{\min}}{n} \sum_{q=q_{\text{вип}}+1}^n C_n^q p^q (1-p)^{n-q}$
М'яке рішення	$p_{\text{дек}} \leq \frac{1}{2} (2^K - 1) \cdot Q \left( \sqrt{2 \cdot h_0^2 \cdot R_{\text{код}} \cdot d_{\min}} \right)$
Згортковий код	$p_{\text{дек}} = \omega_{df} \cdot Q \left( \sqrt{2d_f R_{\text{код}} h_0^2} \right)$
Турбо-код	$p_{\text{дек}} = f(d_f R_{\text{код}} h_0^2) \sum_{d_f \leq d} \omega_{df} \left( e^{-R_{\text{код}} h_0^2} \right)$
LDPC	$p_{i+1} = p_0 \cdot \binom{j-1}{\frac{j-1}{2}} \cdot (k-1)^{\frac{j-1}{2}} \cdot p_i^{\frac{j-1}{2}}, \text{ якщо } \text{mod}(j, 2) = 1$ $p_{i+1} = p_0 \cdot \binom{j-1}{\frac{j}{2}} \cdot (k-1)^{\frac{j}{2}} \cdot p_i^{\frac{j}{2}}, \text{ якщо } \text{mod}(j, 2) = 0.$
СКК (КАМ + м'яке рішення РС)	$p = \frac{4(\sqrt{M} - 1)}{n\sqrt{M}} \cdot Q \left( \sqrt{\frac{3n}{M-1} \cdot h_0^2} \right)$ $p_{\text{дек}} \leq \frac{1}{2} (2^K - 1) \cdot Q \left( \sqrt{2 \cdot h_0^2 \cdot R_{\text{код}} \cdot d_{\min}} \right)$

На рисунку 3.2 зображено графік завадостійкості сигналів при застосуванні сучасних коректувальних кодів із різною кодовою швидкістю.

Основними параметрами, що впливають на пропускну здатність каналу є обраний завадостійкий код і вид модуляції. Всі формули, що використовуються для розрахунків наведені нижче в табл. 3.1 та 3.2.

На рисунку 3.3 видно, що при використанні модуляції КАМ-64 найбільший енергетичний виграш кодування досягається при використанні каскадного коду, що дозволяє знизити вимоги до відношення сигнал/шум без збільшення ймовірності помилки на виході декодера. Значення відношення сигнал/шум та ЕВК для різних видів коректувальних кодів наведено у табл. 3.3.

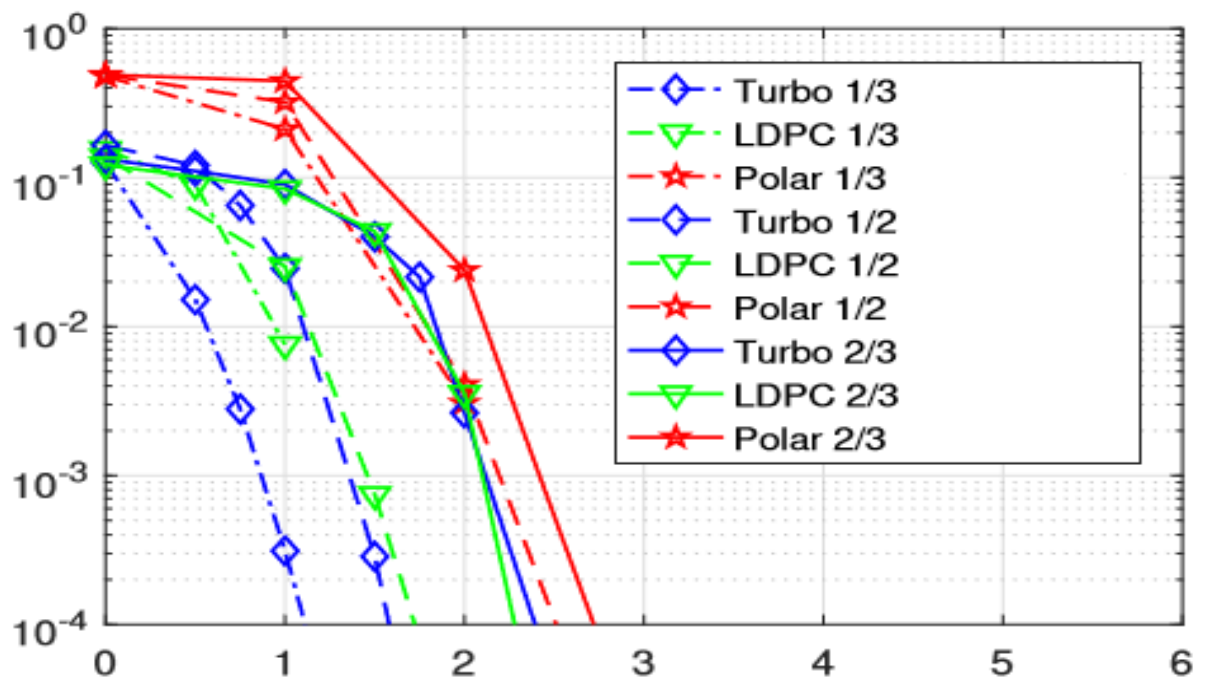


Рисунок 3.2 - Залежність ймовірності бітової помилки від відношення сигнал/шум з використанням різних видів коректувальних кодів

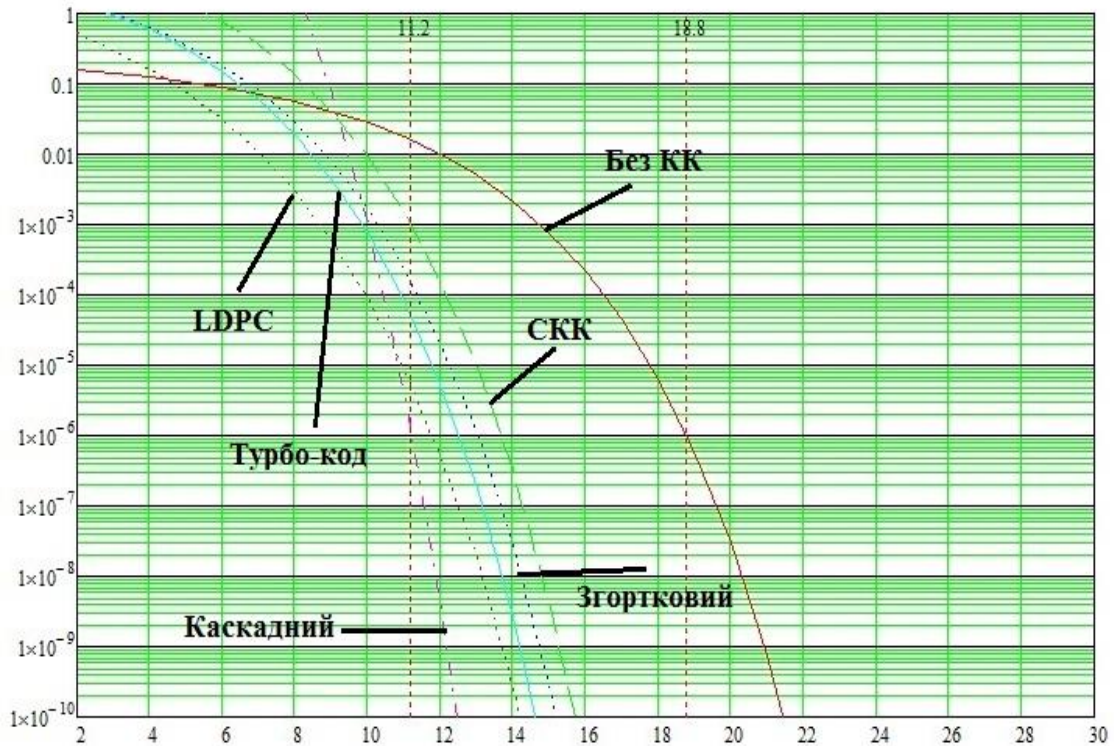


Рисунок 3.3 – Графік залежності ймовірності помилку біту від відношення сигнал/шум при використанні різних видів коректувальних кодів

Таблиця 3.3 – Значення відношення сигнал/шум та ЕВК при використанні різних видів коректувальних кодів

Вид КК	Без КК	Згортковий	Каскадний	Турбо-код	СКК	LDPC
Параметр						
$h_0^2$ (КАМ-64), дБ	18,8	13,1	11,2	12,8	13,7	11,9
ЕВК (КАМ-64), дБ	-	5,7	7,6	6	5,1	6,9

Розрахунки для коректувальних кодів проводилися при використанні модуляції КАМ-64. Проте, крім КАМ-64, у модемах, можуть використовуватися такі види модуляції як ФМ-4 (рис. 3.4), КАМ-16 (рис. 3.5) та КАМ-256 (рис. 3.6). Результати зведені до табл. 3.4, 3.5 та 3.6 відповідно.

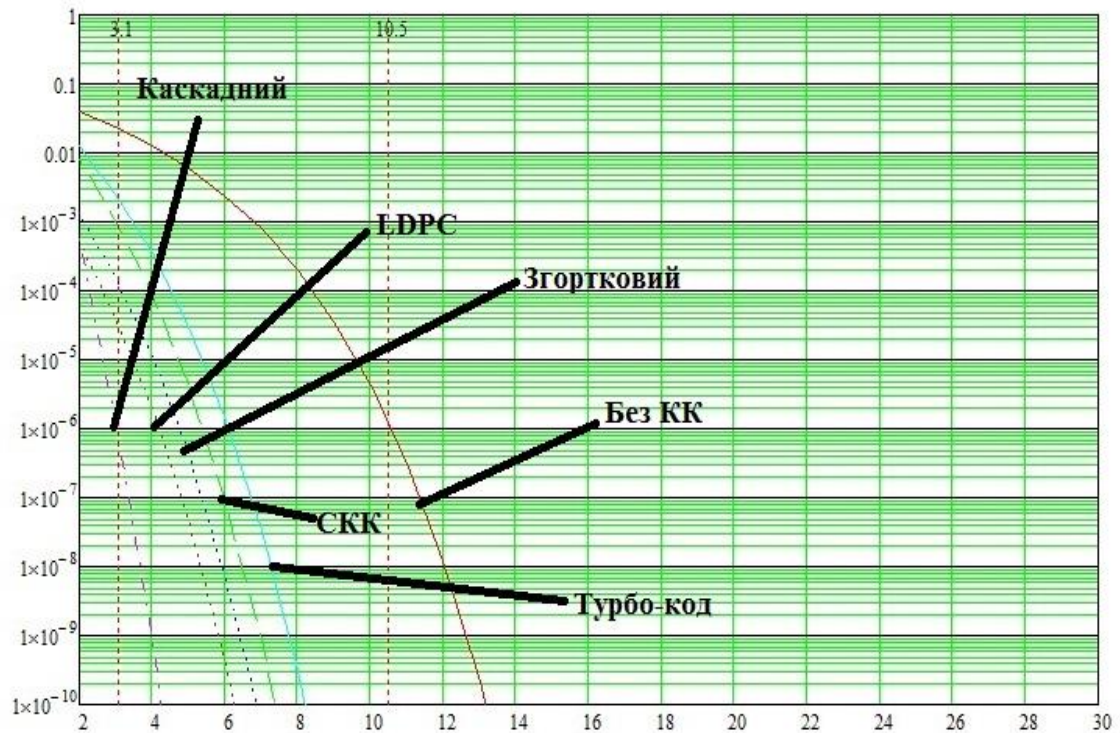


Рисунок 3.4 – Графік залежності ймовірності помилку біту від відношення сигнал/шум при використанні модуляції ФМ-4 та різних видів коректувальних кодів

Таблиця 3.4 – Значення відношення сигнал/шум та ЕВК при використанні модуляції ФМ-4 та різних видів коректувальних кодів

Вид КК	Без КК	Згортковий	Каскадний	Турбо-код	СКК	LDPC
Параметр						
$h_0^2$ (ФМ-4), дБ	10,5	5,1	3,1	6,1	5,7	4,2
ЕВК (ФМ-4), дБ	-	5,4	7,4	4,4	4,8	6,3



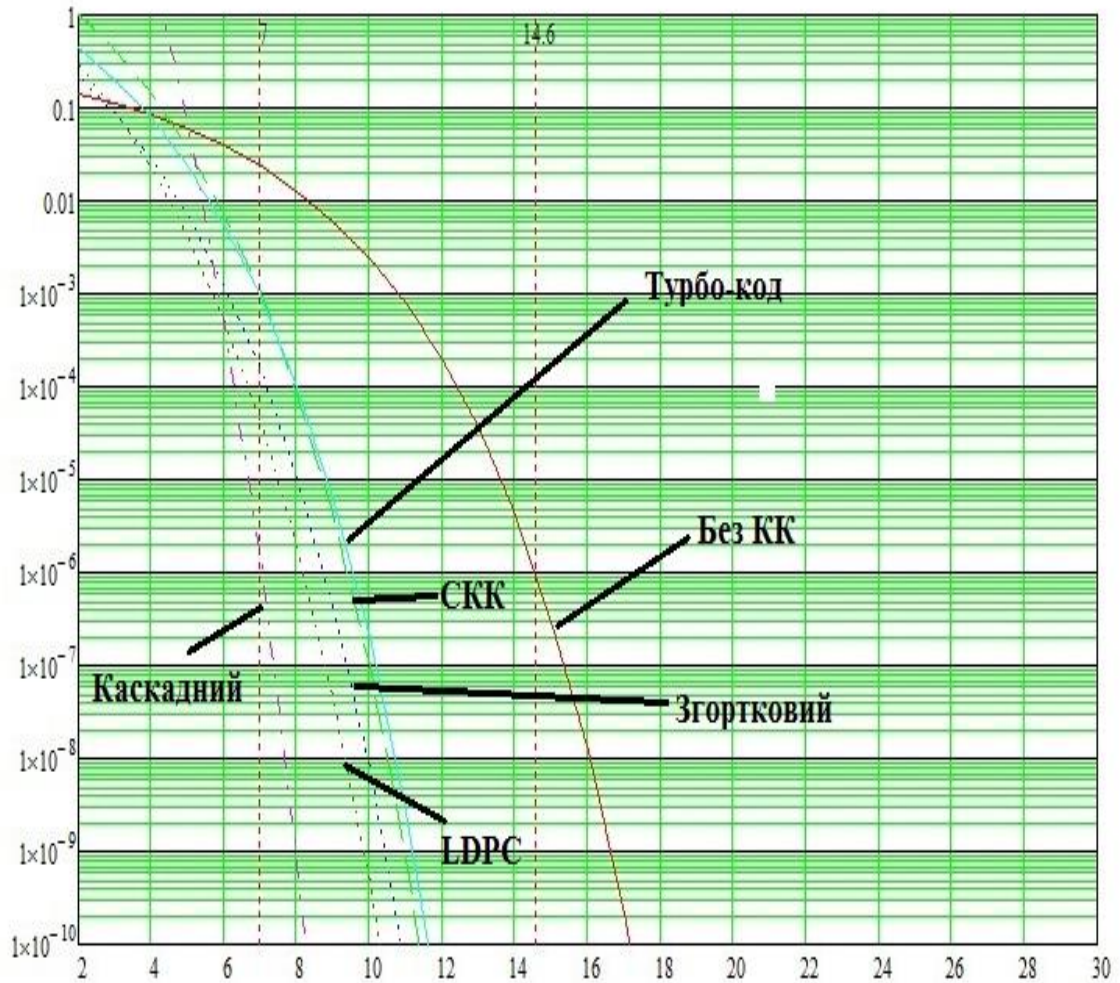


Рисунок 3.5 – Графік залежності ймовірності помилку біту від відношення сигнал/шум при використанні модуляції КАМ-16 та різних видів коректувальних кодів

Таблиця 3.5 – Значення відношення сигнал/шум та ЕВК при використанні модуляції КАМ-16 та різних видів коректувальних кодів

Вид КК	Без КК	Згортковий	Каскадний	Турбо-код	СКК	LDPC
Параметр						
$h_0^2$ (КАМ-16), дБ	14,6	8,7	7	9,6	9,5	8,1
ЕВК (КАМ-16), дБ	-	5,9	7,6	5	5,1	6,5

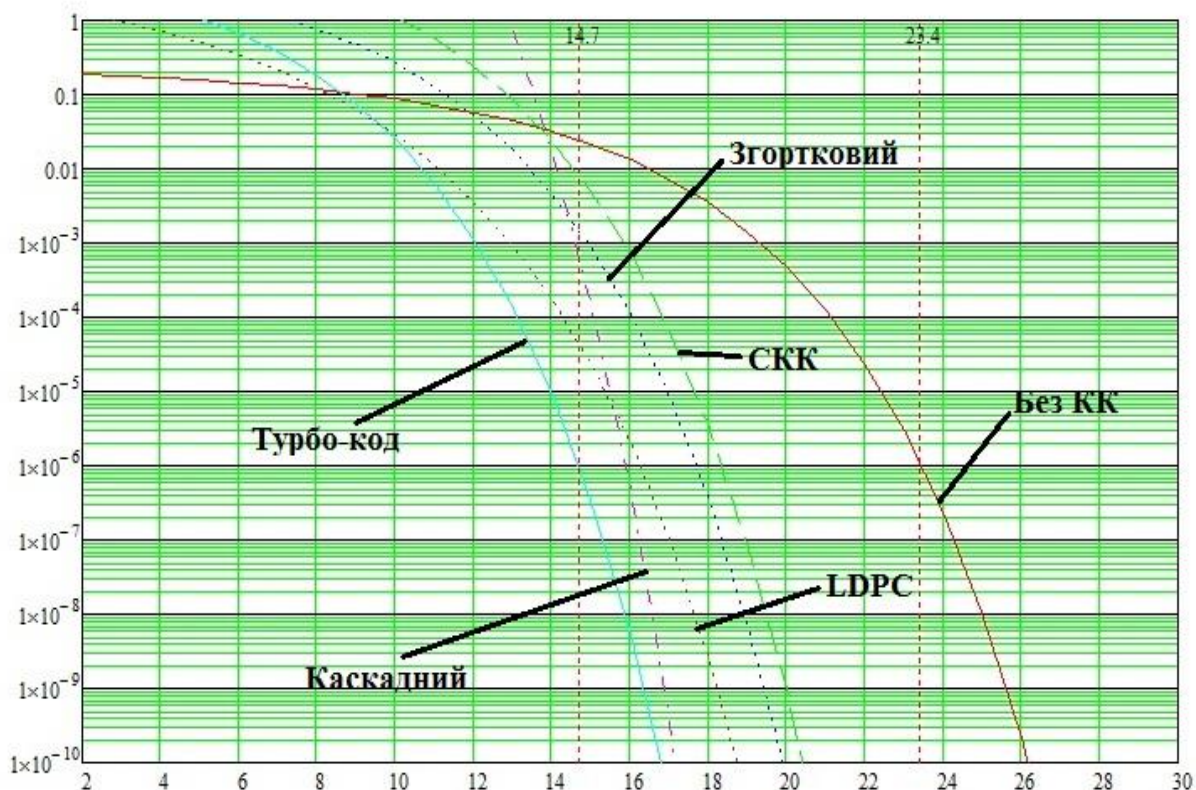


Рисунок 3.6 – Графік залежності ймовірності помилку біту від відношення сигнал/шум при використанні модуляції КАМ-256 та різних видів коректувальних кодів

Таблиця 3.6 – Значення відношення сигнал/шум та ЕВК при використанні модуляції КАМ-256 та різних видів коректувальних кодів

Вид КК	Без КК	Згортковий	Каскадний	Турбо-код	СКК	LDPC
Параметр						
$h_6^2$ (КАМ-256), дБ	23,4	17,8	15,9	14,7	18,4	16,2
ЕВК (КАМ-256), дБ	-	5,6	7,5	8,7	5	7,2

Як можна побачити з вище приведених графіків та результатів розрахунків, найвищий енергетичний вигравш кодування досягається при поєднанні КАМ-256 та турбо-коду. При використанні інших видів модуляції (ФМ-4, КАМ-16, КАМ-64) найвище значення ЕВК забезпечує використання каскадного коду.

### 3.3 Розрахунок надійності модемів зі структурним резервуванням

Проведемо розрахунок підвищення надійності модемів за рахунок структурного резервування.

Для відмови системи з паралельним з'єднанням елементів протягом наробітку  $t$  необхідно й достатньо, щоб всі її елементи відмовили протягом цього наробітку. Так що відмова системи полягає в сумісній відмові всіх елементів, ймовірність чого (за припущення незалежних відмов) може бути знайдена за теоремою добутку ймовірностей як добуток ймовірностей відмов елементів:

$$Q = q_1 q_2 \dots q_n = \prod_{i=1}^n q_i = \prod_{i=1}^n (1 - p_i) \quad (3.10)$$

$$P = 1 - Q = 1 - \prod_{i=1}^n q_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i) \quad (3.11)$$

тобто, надійність системи з паралельним з'єднанням зростає при збільшенні кількості елементів.

Для систем з рівнонадійних елементів ( $p_i = p$ )

$$P = 1 - (1 - p)^n \quad (3.12)$$

Резервування одного основного елемента одним резервним називається дублюванням.

$$P_d = 1 - (1 - P_o)^2 \quad (3.13)$$

Згідно з формулами (2.1) та (2.2) оцінемо виграш від дублювання модему.

$$G_q = \frac{Q_d}{Q_o} = \frac{Q_o^2}{Q_o} = \frac{(1 - P_o)^2}{(1 - P_o)} \quad (3.14)$$

$$G_p = \frac{P_d}{P_o} = \frac{1 - (1 - P_o)^2}{P_o} = \frac{1 - Q_o^2}{1 - Q_o} \quad (3.15)$$

За ймовірності безвідмовної роботи 0,99

$$P_d = 1 - (10^{-2})^2 = 1 - 10^{-4}$$

$$G_q = \frac{10^{-4}}{10^{-2}} = 10^{-2} \quad (3.16)$$

$$G_p = \frac{1 - 10^{-4}}{1 - 10^{-2}} = 1.01$$

Тобто (згідно з формулою 3.16) вигреш у надійності від дублювання модему складає 20 дБ. Це, звичайно, більше ніж при інформаційному резервуванні, але потребує і значно більше витрат.

### 3.4 Висновки до розділу 3

У цьому розділі проведено розрахунки надійності при інформаційному та структурному резервуванні.

Для інформаційного резервування дана оцінки ймовірності бітової помилки для різних видів модуляції (ФМ-4, КАМ-16, КАМ-64, КАМ-256), досліджена залежність значення ймовірності помилки на біт від відношення сигнал/шум при використанні вищеназваних видів модуляції та коректувальних кодів (турбо-код, СКК, згортковий, каскадний та LDPC), розраховано значення енергетичного виграшу кодування. Найвищий енергетичний вигреш кодування було досягнуто поєднанням модуляції КАМ-256 та турбо-кодом.

Для структурного резервування оцінено вигреш від дублювання модемів. Аналіз показав, що дублювання дає більший вигреш ніж завадостійке кодування, але потребує більших витрат.

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У магістерській роботі проведено огляд модемів, досліджено підвищення надійності за рахунок різних методів резервування, тестування, моніторингу, використання високоякісних компонентів, забезпечення оптимальних умов експлуатації.

З'ясовано, що резервування є ефективним способом підвищення надійності модемів. Зроблено порівняння структурного та інформаційного резервування за показником виграшу надійності та втратами.

У роботі були розглянуті параметри високошвидкісних модемів, які впливають на надійність, а саме коректувальний код і модуляція. У даній роботі розглядалися такі види коректувальних кодів, як згортковий код, турбо-код, сигнально-кодова конструкція, каскадний код та LDPC-код.

Для інформаційного резервування дана оцінки ймовірності бітової помилки для різних видів модуляції, досліджена залежність значення ймовірності помилки на біт від відношення сигнал/шум при використанні видів модуляції ФМ-4, КАМ-16, КАМ-64, КАМ-256 та коректувальних кодів (турбо-код, СКК, згортковий, каскадний та LDPC), розраховано значення енергетичного виграшу кодування.

Найвищий ЕВК було досягнуто поєднанням модуляції КАМ-256 та турбо-кодом.

Для структурного резервування оцінено виграш від дублювання модемів. Аналіз показав, що дублювання дає більший виграш ніж завадостійке кодування, але потребує більших витрат.