

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Інститут телекомунікаційних систем

Кафедра інформаційно-комунікаційних технологій та систем

«На правах рукопису»
УДК 621.391

«До захисту допущено»

ВО завідувача кафедри

_____ Валерій ПРАВИЛО

«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

**на тему: «Методика підтримання сталої швидкості передавання
інформації джерела в каналі зв'язку з обмеженими частотно-
енергетичними ресурсами»**

Виконав:

студент II курсу, групи ТС-01мп

Корнієнко Андрій Андрійович _____

Керівник:

професор, доктор технічних наук

Уривський Л.О. _____

Рецензент:

Завідувач кафедри радіотехнічних пристроїв та систем

КПІ ім. Ігоря Сікорського

д.т.н., проф. Жук С.Я _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2021 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут телекомунікаційних систем

Кафедра інформаційно-комунікаційних технологій та систем

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (освітня програма) – 172 «Телекомунікації та радіотехніка» («Телекомунікаційні системи та мережі»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

ВО завідувача кафедри

_____ Валерій ПРАВИЛО

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Корнієнко Андрію Андрійовичу

1. Тема дисертації «Методика підтримання сталої швидкості передавання інформації джерела в каналі зв'язку з обмеженими частотно-енергетичними ресурсами», науковий керівник дисертації Уривський Леонід Олександрович, д. т. н., професор, затверджені наказом по університету від «04» листопада 2021 р. № 3672с.
2. Термін подання студентом дисертації 10.12.2021 р.
3. Об'єктом дослідження є властивість джерела повідомлень підтримувати сталу швидкість передавання інформації шляхом вибору необхідних параметрів системи передачі.
4. Предметом дослідження являються способи вирішення проблеми надання високоякісного зв'язку при умові незмінної продуктивності джерела при зміні частотної смуги передачі.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: провести аналіз впливу ресурсів сучасних систем зв'язку на можливість забезпечувати необхідну

якість передачі інформації на фізичному рівні; показати взаємозв'язок відомих формулювань щодо вирішення проблеми надання високоякісного зв'язку з фіксованим ресурсом при використанні додаткового ресурсу каналу зв'язку; описати методику забезпечення заданої достовірності на основі вибору типу модуляції та параметру надлишкового коду за умови сталості продуктивності джерела повідомлень при зміні частотної смуги передачі.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

- 1) Тема, мета та завдання магістерської дисертації;
- 2) Основні задачі які розглядаються у дослідженні;
- 3) Актуальність проведення дослідження на дану тематику;
- 4) Взаємозв'язок ресурсів каналу зв'язку та їх вплив на результуючу продуктивність джерела повідомлень;
- 5) Вплив типу модуляції та параметрів надлишкових кодів на результуючу продуктивність джерела повідомлень;
- 6) Можливості блокового кодування при розширенні спектральних характеристик джерела повідомлень;
- 7) Вирішення задачі забезпечення заданої достовірності за умови сталої продуктивності джерела повідомлень при зміні частотної смуги передачі;
- 8) Ядро методики забезпечення заданої достовірності передачі інформації за умови сталої продуктивності джерела;
- 9) Методика забезпечення заданої достовірності на основі вибору параметрів блоку коду та типу модуляції за умови сталої продуктивності джерела повідомлень при зміні частотної смуги передачі;
- 10) Представлення нової задачі отриманої у результаті проведення дослідження;
- 11) Висновки та рекомендації;

12) Перелік виконаних публікацій на тематику магістерського дослідження.

7. Перелік публікацій

1. *Уривський Л.О., Корнієнко А.А.* Методика визначення параметру швидкості кодування за алгоритмом управління ситуацією в каналі зв'язку при незмінності продуктивності джерела повідомлень. - К.: ІТС КПІ ім. Ігоря Сікорського, XV Міжнародна НТК «Перспективи телекомунікацій», /Збірник матеріалів. – 2021, с.62...65.

2. Uryvsky L., Korniienko A., Shmigel B. Analysis of Telecommunication Channel Spectral Characteristics with Block Coding at a Constant Speed of the Message Source / Information & Telecommunication Sciences. – К.: Igor Sikorsky KPI, № 1, 2021. – p.p. 55-61.

<http://infotelesc.kpi.ua/issue/view/14116>

8. Дата видачі завдання: 22.10.2020 р.

9. Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Робота над першим розділом: 1) розкрити характеристики ресурсів сучасних систем зв'язку та їх можливість задовольняти потреби споживачів шляхом надання телекомунікаційних послуг з необхідною якістю з позиції забезпечення заданої достовірності передачі інформації на фізичному рівні (п. 1.1);	15.10.20 – 01.12.20	Виконано
	2) проаналізувати відомі дослідження щодо вирішення проблеми надання високоякісного зв'язку при умовах сталості продуктивності чи швидкості джерела повідомлень та використанні додаткового частотного ресурсу (п. 1.2).	02.12.20 – 31.12.20	Виконано
2	Робота над другим розділом: 1) описати взаємозв'язок ресурсів каналу зв'язку з результуючою продуктивністю джерела повідомлення (п. 2.1);	10.01.21 – 10.02.21	Виконано

	<p>2) проаналізувати вплив параметрів блокових надлишкових кодів та типу модуляцій на забезпечення необхідної достовірності при використанні додаткових ресурсів каналу зв'язку (п. 2.2.);</p> <p>3) провести аналіз алгоритму управління параметрами каналу зв'язку для забезпечення заданої достовірності за умов сталої продуктивності (п. 2.3).</p>	<p>11.02.21 – 18.03.21 19.03.21 – 18.04.21</p>	<p>Виконано</p> <p>Виконано</p>
3	<p>Робота над третім розділом:</p> <p>1) провести аналіз умов досягнення послуг високоякісного зв'язку за умови незмінності швидкості джерела повідомлень при зміні частотної смуги передачі (п. 3.1);</p> <p>2) вирішення задачі забезпечення заданої достовірності за умови сталої продуктивності джерела повідомлень при зміні частотної смуги передачі (п. 3.2);</p> <p>3) провести аналіз впливу зміни кратності модуляції з подальшим розширенням частотної смуги передачі на поставлені умови щодо достовірності передачі та незмінності продуктивності джерела повідомлень (п. 3.3);</p> <p>4) виконати оцінку доцільності витрачених ресурсів каналу зв'язку при наближенні до екстремуму продуктивності джерела повідомлень (п. 3.4);</p> <p>5) описати методику забезпечення заданої достовірності на основі вибору параметрів блоку коду та типу модуляції за умови сталої продуктивності джерела повідомлень при зміні частотної смуги передачі (п. 3.5).</p>	<p>19.04.21 – 30.04.21</p> <p>05.05.21 – 25.05.21</p> <p>26.05.21 – 05.06.21</p> <p>06.06.21 – 25.06.21</p> <p>01.09.21 – 24.09.21</p>	<p>Виконано</p> <p>Виконано</p> <p>Виконано</p> <p>Виконано</p> <p>Виконано</p>
4	<p>Оформлення дипломної роботи:</p> <p>1) написання вступу та висновків до 1-3 розділів, а також висновку до дипломної роботи;</p> <p>2) оформлення роботи (нумерація рисунків, абзаци тощо), переліку скорочень та літератури.</p>	<p>25.09.21 – 10.10.21</p> <p>11.10.21 – 01.11.21</p>	<p>Виконано</p> <p>Виконано</p>

Студент

Андрій КОРНІЄНКО

Науковий керівник дисертації

Леонід УРИВСЬКИЙ

РЕФЕРАТ

Темою магістерської дисертації є дослідження можливостей підтримки сталої швидкості передавання інформації джерела повідомлень.

Робота містить 119 сторінок, зокрема 34 ілюстрацій, 23 таблиці та 52 джерела інформації.

Актуальність дослідження полягає у новітньому підході до вирішення задачі забезпечення високоякісного зв'язку шляхом розширення частотної смуги передачі, з метою компенсувати ресурс системи зв'язку який відводиться на підтримання необхідної достовірності передачі.

Метою дисертації є розробка методики підтримання сталої швидкості передавання інформації джерела, в основу якої покладені рекомендації щодо вибору типу модуляції та параметрів завадостійкого кодування.

Об'єктом дослідження є джерело повідомлень та його властивість підтримувати сталу швидкість передавання інформації шляхом вибору необхідних параметрів системи передачі.

Вирішення задач у дослідженні передбачало модернізацію методики синтезу коригуючих кодів при фіксованих ресурсах каналу зв'язку відносно нових вимог щодо якості передачі та сталості продуктивності джерела. При виконанні роботи використовувався ПЗ MS Excel.

Результати дисертації апробовані на XV Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективи телекомунікацій» та у журналі «Інформаційні та телекомунікаційні науки».

Ключові слова: теорія кодування, завадостійкий код, теорія інформації, достовірність, продуктивність джерела, бітова ймовірність помилки, модуляція, довжина блоку коду

ABSTRACT

The topic of the master's dissertation is the study of the possibilities of maintaining a constant speed of transmission of information from the source of messages.

The work contains 119 pages, including 34 illustrations, 23 tables and 52 sources of information.

The relevance of the study lies in the latest approach to solving the problem of providing high-quality communication by expanding the transmission bandwidth, in order to compensate for the resource of the communication system that is allocated to maintain the necessary reliability of transmission.

The purpose of the dissertation is to develop a method for maintaining a constant rate of transmission of source information, which is based on recommendations for choosing the type of modulation and noise-tolerant coding parameters.

The object of research is the source of messages and its ability to maintain a constant speed of information transmission by selecting the necessary parameters of the transmission system.

Solving the problems in the study involved the modernization of the method of synthesis of correction codes with fixed resources of the communication channel in relation to the new requirements for transmission quality and sustainability of source performance.

The results of the dissertation were tested at the XV International Scientific and Technical Conference "Prospects of Telecommunications" and in the journal "Information and Telecommunications Sciences".

Keywords: *coding theory, error controlled code, information theory, certainty, productivity of source, bit error probability, modulations, code block length*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	12
ВСТУП	14
1 ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СУЧАСНИХ ДЖЕРЕЛ ПОВІДОМЛЕНЬ	17
1.1 Характеристика джерела повідомлень забезпечувати інформаційну потребу сучасних споживачі	17
1.2 Вплив ресурсів новітніх систем зв'язку на можливість забезпечити необхідну якість передачі інформації на фізичному рівні.....	23
1.3 Аналіз відомих досліджень щодо вирішення проблеми надання високоякісного зв'язку при умовах сталості продуктивності чи швидкості джерела повідомлень та використанні додаткового частотного ресурсу.....	37
1.4 Постановка завдання дослідження	40
Висновки з розділу 1	42
2 АНАЛІЗ ВПЛИВУ ІНСТРУМЕНТІВ ПІДТРИМАННЯ ВИСОКОЯКІСНОГО ЗВ'ЯЗКУ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ ДЖЕРЕЛА ПОВІДОМЛЕНЬ.....	43
2.1 Взаємозв'язок ресурсів каналу зв'язку та результуючої продуктивності джерела повідомлень	43
2.2 Аналіз впливу типу модуляції та параметрів блокових кодів на забезпечення заданої достовірності при використанні додаткових ресурсів каналу зв'язку.....	50
2.2.1 Аналіз впливу типу модуляції на параметри системи зв'язку	50
2.2.2 Аналіз впливу параметрів блокових кодів на параметри системи зв'язку	55
Висновки з розділу 2.....	61

3 АНАЛІЗ ПРОВЕДЕНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАНОЇ ДОСТОВІРНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ В УМОВАХ СТАЛОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ ДЖЕРЕЛА ПОВІДОМЛЕНЬ.....	63
3.1 Можливості блокового кодування при розширенні спектральних характеристик джерела повідомлень	63
3.2 Аналіз алгоритму управління параметрами каналу зв'язку для забезпечення заданої достовірності за умови сталої продуктивності	76
Висновки до розділу 3	82
4 МЕТОДИКА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАНОЇ ДОСТОВІРНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ ЗА УМОВИ СТАЛОЇ ШВИДКОСТІ ДЖЕРЕЛА ПОВІДОМЛЕНЬ	83
4.1 Аналіз умов досягнення послуг високоякісного зв'язку за умови незмінності швидкості джерела повідомлень при зміні частотної смуги передачі	83
4.2 Вирішення задачі забезпечення заданої достовірності за умови сталої продуктивності джерела повідомлень при зміні частотної смуги передачі	86
4.3 Аналіз впливу зміни кратності модуляції з подальшим розширенням частотної смуги передачі на поставлені умови щодо достовірності передачі та незмінності продуктивності джерела повідомлень	93
4.4 Оцінка доцільності витрачених ресурсів каналу зв'язку при наближенні до екстремуму продуктивності джерела повідомлень	101
4.5 Опис методики забезпечення заданої достовірності на основі вибору параметрів блоку коду та типу модуляції за умови сталої продуктивності джерела повідомлень при зміні частотної смуги передачі	105
Висновки до розділу 4	109
ВИСНОВКИ.....	110

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	112
ДОДАТОК А.....	118

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

3GPP	3rd Generation Partnership Project – консорціум, який розробляє специфікації для мобільної телефонії
AAS	Active Antenna Systems – активна антенна система
eMBB	Enhanced Mobile Broadband – це розширення послуг, що вперше включається мережами 4G LTE, що забезпечує високу швидкість передачі даних у широкій зоні покриття
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers – інститут інженерів електротехніки та електроніки
IoT	Internet of Things – концепція мережі передачі між фізичними об'єктами («речами»), оснащеними вбудованими засобами і технологіями взаємодії друг з одним чи із довкіллям
LTE	Long-Term Evolution – довготривалий розвиток
MCS	Modulation and Coding Scheme – схема модуляції та кодування
MIMO	Multiple Input Multiple Output – множинні входи, множинні виходи
OBSS	Overlapping Basic Service Set – базовий набір послуг, що перекривається
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access – множинний доступ з ортогональним частотним поділом
QAM-M (KAM-M)	Quadrature Amplitude Modulation, Multiplicity – квадратурна амплітудна модуляція, кратність
SAE	Simultaneous Authentication of Equals – одночасна аутентифікація рівних
SCS	Subcarrier Spacing – інтервал між піднесучими

SRS	Sounding Reference Signal – випромінювання опорного сигналу
TWT	Target Wake-up Time – цільовий час пробудження
UE	User Equipment – обладнання користувача
URLLC	Ultra-Reliable Low Latency Communication – наднадійний зв'язок з низькою затримкою
Wi-Fi	Wireless Fidelity – бездротова точність – технологія бездротової локальної мережі з пристроями на основі стандартів IEEE 802.11
WPA	Wi-Fi Protected Access – захищений доступ до Wi-Fi
ВОЛЗ	волоконно-оптичні лінії зв'язку

ВСТУП

У сучасному світі повсякденне життя кожної людини пов'язане з телекомунікаційними технологіями. Суспільство кожного дня передає великі обсяги інформації за допомогою сучасних систем зв'язку, але потреби з кожною хвилиною лише зростають. Саме тому розвиток систем передачі інформації не стоїть на місці, а рухається у напрямку збільшення швидкості передачі даних. Інакше кажучи, розвиток тримає напрямом збільшення кількості переданої інформації, яке видає джерело повідомлень.

Система передачі даних використовує ресурси каналу зв'язку по якому здійснюється передача корисної інформації. Невідповідальне ставлення до оцінки та розподілу ресурсів каналу зв'язку при налаштуванні параметрів системи передачі може призвести до незадовільної якості переданої інформації. Інакше кажучи, передача інформації з дуже великою швидкістю, без підтримання її якості, передбачає втрату корисних властивостей переданої інформації. Це має негативний вплив на якість надання телекомунікаційних послуг.

Робота присвячена забезпеченню заданої достовірності передачі інформації за умови сталої продуктивності джерела повідомлень у процесі розширення частотного ресурсу для надання його завадостійкому кодуванню. Модулюючи різні стани функціонування системи передачі інформації при заданих обмеженнях, використовується інженерне програмне забезпечення для проведення обширних розрахунків, у результаті яких надаються апроксимації залежностей для визначення параметрів системи передачі за умови сталої продуктивності, та формується комплексна графічна методика забезпечення сталої швидкості передавання інформації джерела повідомлень у каналі зв'язку з обмеженим частотно-енергетичним ресурсом.

В першому розділі роботи описується головний параметр джерела повідомлень, що називається продуктивністю джерела та характеризується кількістю виданої інформації джерелом за одиницю часу. Проводиться аналіз відомих формулювань щодо вирішення проблеми надання високоякісного зв'язку за умови сталої продуктивності джерела при обмежених частотно-енергетичних ресурсах каналу зв'язку. Виконується постановка завдання дослідження цієї магістерської дисертації.

У другому розділі спочатку аналізується взаємозв'язок ресурсів каналу зв'язку та їх вплив на результуючу продуктивність джерела повідомлень. Описуються інструменти забезпечення достовірності передачі інформації, а саме модуляції та надлишкові блокові коди, та аналізується їх вплив на результуючу продуктивність джерела повідомлень.

Третій розділ демонструє проведені дослідження щодо можливостей блокового кодування при процесі розширення спектральних характеристик джерела повідомлень та виконується аналіз управління параметрами каналу зв'язку для задоволення поставлених вимог у роботі.

У четвертому розділі спочатку проводиться аналіз умов досягнення високоякісного зв'язку, а потім вирішується задача забезпечення заданої достовірності при умові сталості продуктивності, розширюючи частотний ресурс каналу зв'язку. Проводиться аналіз впливу зміни кратності модуляції на результат вирішеної задачі та оцінка доцільності витрачених ресурсів каналу зв'язку при наближенні до екстремуму продуктивності. Виконується опис комплексної графічної методики забезпечення заданої достовірності передачі інформації на основі вибору типу модуляції та параметрів кодування за умови сталої продуктивності джерела повідомлень при зміні частотної смуги передачі.

Об'єктом дослідження є джерело повідомлень при вимогах до сталої характеристики продуктивності.

1 ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СУЧАСНИХ ДЖЕРЕЛ ПОВІДОМЛЕНЬ

1.1 Характеристика джерела повідомлень забезпечувати інформаційну потребу сучасних споживачі

Для людини на першому місці завжди була інформаційна потреба. З кожним днем ця потреба лише збільшується, тому розробляються різні інструменти для її задоволення. Так, у сучасному світі головним інструментом для задоволення інформаційної потреби людства є телекомунікаційні системи. Вони призначені для передачі великої кількості інформації на великі відстані.

Системи передачі інформації складаються з багатьох елементів, які виконують низку перетворень для успішного здійснення процесу передачі інформації від передавача до приймача. У цій дисертації детально будемо розбирати елемент системи передачі, що називається джерелом повідомлень.

У випадку задоволення інформаційних потреб споживачів, характеристика джерела повідомлень потребує кількісне визначення інформації. Основою вимірювання кількості інформації є ймовірнісні характеристики повідомлень, що передаються. Ці характеристики не пов'язані з певним змістом повідомлень, а відображають степінь їх невизначеності. Тобто, чим менша ймовірність повідомлення, тим більше інформації воно несе

Кількість інформації $I(x_i)$ в окремому одиничному повідомленні x_i визначається величиною, зворотної ймовірності появи повідомлення $p(x_i)$ і обчислюється в логарифмічних одиницях [18]:

$$I(x_i) = \log_b \left(\frac{1}{p(x_i)} \right) = -\log_b(p(x_i)), \quad (1.1)$$

Логарифмічна міра, вперше запропонована в 1928 р. англійським ученим Р. Хартлі, має властивість адитивності, що відповідає нашим

інтуїтивним уявленням про інформацію. Крім того, кількість інформації, обчислена за (1.1), дорівнює нулю, що відповідає прийнятому визначенню інформації.

Якщо джерело видає залежні повідомлення $x_i = x_1, \dots, x_m$, всі вони характеризуються умовними ймовірностями $p\left(\frac{x_i}{x_1, \dots, x_m}\right)$. І в цьому випадку кількість інформації обчислюється за формулою (1.1) з підстановкою до неї умовних ймовірностей повідомлень.

Вибір основи логарифмів у формулі (1.1) визначає одиниці виміру кількості інформації. З використанням десяткового логарифму ($b = 10$) інформація вимірюється в десяткових одиницях – дитах. У разі використання натуральних логарифмів одиницею виміру є натуральна одиниця – нат.

Дослідження проводяться з урахуванням того, що системи передачі працюють із двійковими кодами ($b = 2$), і тоді інформація вимірюється в двійкових одиницях – дв.од. Часто замість двійкових одиниць використовується еквівалентна назва – біт, що виник як скорочений запис англійських слів binary digit (двійкова цифра). 1 біт це кількість інформації, що передається одиничним символом повідомлення, ймовірність передачі якого $p(x_i) = 0,5$:

$$I(x_i) = \log_2\left(\frac{1}{0,5}\right) = -\log_2(0,5) = 1 \text{ [біт]}$$

В даний час термін біт в інформатиці, обчислювальної та імпульсної техніки вживається не тільки як одиниця кількості інформації, але і для позначення числа двійкових символів 0 і 1, оскільки вони зазвичай рівноймовірні і кожен з них несе 1 біт інформації.

Кількість інформації у повідомленні, складеному із n символів, визначається за формулою [18]:

$$I(x, n) = -n \cdot \sum_{i=1}^m p(x_i) \cdot \log_2(p(x_i)), \quad (1.2)$$

де: $i = \{1, \dots, m\}$ – номер символу x_i з алфавіту джерела;

$p(x_i)$ – ймовірність передачі i – го символу.

Більшість реальних джерел повідомлення мають різні ймовірності. Наприклад, у тексті букви А, О, Е зустрічаються порівняно часто, а Щ, Ы – рідко. Згідно з експериментальними даними характерні безумовні ймовірності, зведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Експериментальні безумовні ймовірності букв

буква	ймовірність	буква	ймовірність	буква	ймовірність
пробел	0,175	М	0,026	Ч	0,012
О	0,090	Д	0,025	Й	0,010
Е	0,072	П	0,023	Х	0,009
А	0,062	У	0,021	Ж	0,007
И	0,062	Я	0,018	Ю	0,006
Т	0,053	Ы	0,016	Ш	0,006
Н	0,053	З	0,016	Ц	0,004
С	0,045	Ь, Ъ	0,014	Щ	0,003
Р	0,040	Б	0,014	Э	0,003
В	0,038	Г	0,013	Ф	0,002
Л	0,035	К	0,028		

За різних ймовірностей повідомлення несуть різну кількість інформації $I(x_i)$. При вирішенні більшості практичних завдань необхідно знати середню кількість інформації, що припадає на один елемент повідомлення. Ця середня кількість інформації за загальної кількості елементів повідомлення джерела n і числа символів алфавіту m дорівнює:

$$H(X) = \frac{I(x,n)}{n} = - \sum_{i=1}^m p(x_i) \cdot \log_2(p(x_i)), \quad (1.3)$$

Величину $H(X)$ називають ентропією джерела повідомлень. Термін «ентропія» запозичений із термодинаміки, де вона характеризує середню невизначеність стану системи молекул речовини. Теоретично інформації цей термін запроваджено 1948 р. американським ученим К. Шенноном [51] і далі суворо визначено радянськими математиками А.Я. Хінчіним [48, 49, 50] та О.М. Колмогоровим [31]. Фізично ентропія виражає середню невизначеність стану джерела повідомлень та є об'єктивною інформаційною характеристикою джерела. Ентропія завжди позитивна і набуває максимального значення при рівноймовірних повідомленнях [2]:

$$H_{max}(X) = -\sum_{i=1}^m \frac{1}{m} \cdot \log_2 \left(\frac{1}{m} \right) = \log_2(m), \quad (1.4)$$

Мінімальне значення ентропії $H_{min}(X) = 0$ відповідає випадку, коли одна з ймовірностей $p(x_i) = 1$, інші рівні нулю, тобто є повна визначеність.

Для джерела із залежними повідомленнями ентропія теж обчислюється як математичне очікування кількості інформації однією елемент цих повідомлень. Слід зазначити, що отримане у разі значення ентропії буде менше, ніж джерела незалежних повідомлень. Це впливає з того, що за наявності залежності повідомлень невизначеність вибору зменшується і, відповідно, зменшується ентропія. Так, у тексті після поєднання "чт" найімовірніше, що третьою літерою буде "о" і малоімовірна поява як третя літера "ж" або "ь". У середньому поєднання "що" несе менше інформації, ніж ці літери окремо.

У цьому дослідженні робиться уклін на застосування двійкових джерел в дискретних системах передачі, а вони характеризуються передачею лише двох можливих повідомлень. Причому, якщо можливість передачі однієї з них $p(x_1)$, то можливість передачі іншого $p(x_2) = 1 - p(x_1)$.

Визначимо ентропію двійкового джерела. З формули (1.3) отримаємо:

$$\begin{aligned}
 H(X) &= - \sum_{i=1}^2 p(x_i) \cdot \log_2(p(x_i)) = \\
 &= -p(x_1) \cdot \log_2(p(x_1)) - p(x_2) \cdot \log_2(p(x_2)) \\
 &= -p(x_1) \cdot \log_2(p(x_1)) - (1 - p(x_1)) \cdot \log_2(1 - p(x_1))
 \end{aligned}
 \tag{1.5}$$

Графік залежності (1.5) представлено на рис. 1.1. Як впливає з графіка, ентропія двійкового джерела змінюється не більше від нуля до одиниці. Ентропія дорівнює нулю, коли можливість передачі одного з символів дорівнює нулю чи одиниці, тобто передається лише одне повідомлення. Отримання одного єдино можливого повідомлення ніякої нової інформації не дає. Ентропія двійкового джерела буде максимальна, якщо є найбільша невизначеність, тобто $p(x_1) = p(x_2) = 0,5$. При цьому $H(X) = \log_2(m) = 1$.

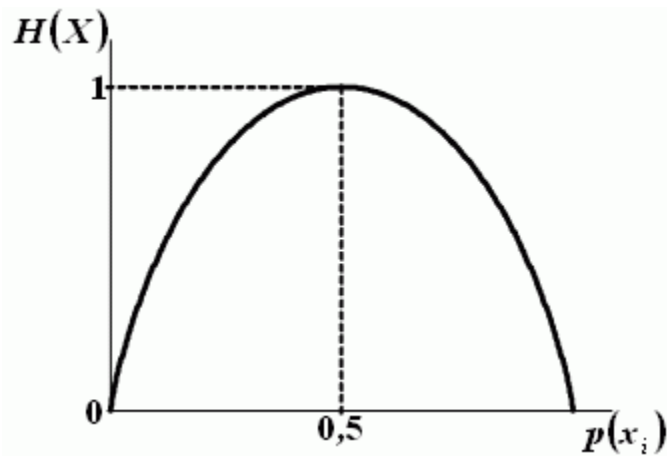


Рисунок 1.1 – Залежність ентропії від ймовірності символів

Варто звернути увагу на поняття надлишковості. Надлишковими в джерелі є повідомлення, які несуть малу, іноді нульову, кількість інформації. Наявність надлишковості означає, що частина повідомлень можна і не передавати каналом зв'язку, а відновити на прийомі по відомим статистичним зв'язкам. Так і робили при передачі телеграм, виключаючи з

тексту прийменники, розділові знаки, оскільки вони легко відновлюються за змістом телеграми на підставі відомих правил побудови фраз.

Кількісно надмірність оцінюється коефіцієнтом надмірності:

$$\chi = \frac{H_{max}(X) - H(X)}{H_{max}(X)} = 1 - \frac{H(X)}{H_{max}(X)}, \quad (1.6)$$

де: $H(X)$ – ентропія джерела;

$H_{max}(X) = \log_2(m)$ – максимальна ентропія джерела з алфавітом у m повідолень.

Надлишковість при передачі повідомлень має свої позитивні та негативні сторони. Збільшення надлишковості призводить до збільшення часу передачі повідомлень, зайвого завантаження каналів зв'язку. За певний проміжок часу каналом передається менша кількість інформації, ніж це можливо; тому одним із завдань теорії інформації та теорії кодування є завдання скорочення надлишковості.

Однак при збільшенні надлишковості з'являється можливість підвищення стійкості перешкод передачі повідомлень. Так, надлишковість тексту дозволяє виправляти окремі помилки або відновлювати пропущені літери або навіть слова. У української та всіх європейських мов надлишковість з урахуванням усіх статистичних залежностей букв приблизно однакова. Вона сформувалася в результаті тривалої, суспільної практики на основі вимог виправлення спотворення слів і фраз під впливом різних факторів, що заважають. Для систем зв'язку встановлюється компромісне значення надлишковості, що забезпечує задану швидкість та надійність передачі повідомлень.

Тепер варто перейти до найголовнішого параметру джерела повідомлень, до якого ставляться вимоги у цьому дослідженні. Для джерел повідомлень з фіксованою швидкістю важливим параметром є його продуктивність $H'(X)$, яка визначається виразом:

$$H'(X) = \frac{1}{T} \cdot H(X), \quad (1.7)$$

де: T – інтервал часу для передачі елементарного повідомлення.

Фізичний зміст продуктивності – кількість інформації, що видається джерелом загалом за одиницю часу (одну секунду) його безперервної роботи. Це дослідження передбачає вимоги щодо сталості продуктивності, а це означає, що будь-які розроблені методика та вирішені задачі повинні забезпечувати передачу сталої кількості інформації відносно початкових параметрів системи зв'язку.

Тобто, збільшення каналної швидкості передачі інформації обумовлює зростання кількості переданої інформації яку може видати джерело повідомлень. Але при цьому потрібно не забувати про якість цієї інформації, бо немає сенсу передавати великі обсяги інформації, якщо розібрати передану інформації на приймальній стороні неможливо.

1.2 Вплив ресурсів новітніх систем зв'язку на можливість забезпечити необхідну якість передачі інформації на фізичному рівні

Завжди головною функцією системи зв'язку була передача інформації від передавача до приймача по каналу зв'язку. Виконання цієї функції вимагає використання певних ресурсів системи передачі та каналу зв'язку. Є декілька варіантів визначення поняття ресурсу для даного випадку:

- джерело, запас чого-небудь;
- можливість, яку можна використати за необхідністю;
- засіб, який можна використати для виробництва тих чи інших благ.

Інформацію варто вважати також ресурсом, але особливим – інформаційним ресурсом. В цьому випадку поняття «ресурсу» потрібно розуміти, як запасу деяких знань, який зменшує міру невизначеності при отриманні інформації про об'єкт. Найголовнішою та ключовою відмінністю

цього ресурсу з ресурсами, які пов'язані з матеріальними предметами є його невичерпність. Очевидно, що методи поновлення та відтворення інформаційного ресурсу також його відрізняють від фізичних ресурсів.

Для виконання функції транспортування інформації по каналу зв'язку система передачі використовує наступні фізичні ресурси, які можна охарактеризувати як ресурси з обмеженим запасом:

- частотний ресурс (смуга або діапазон частот, що відводяться для лінії зв'язку);
- енергетичний ресурс (потужність сигналу, яка вимірюється на вході та виході лінії зв'язку);
- часовий ресурс (час відведений для передачі повідомлення від джерела до отримувача).

Простір також можна враховувати одним із ресурсів системи передачі. Система передачі реалізує основну функцію – передачу інформації між приймачем та передавачем, а вони знаходяться на певній відстані один від одного, і це не залежить від середовища передачі.

Знання можливостей системи зв'язку передбачає собою визначення кількісних характеристик ресурсів наведених вище. Проведемо опис каналу зв'язку та сигналу, що передається по ньому для визначення цих кількісних характеристик кожного з ресурсів.

Наведемо узагальнену спрощену структурну схему каналу зв'язку:

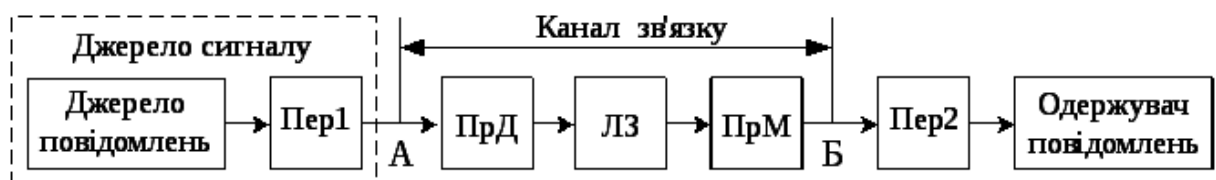


Рисунок 1.2 – Узагальнена структурна схема каналу зв'язку

Сукупність засобів між крапками А та Б, які забезпечують передачу сигналу між цими точками називаються каналом зв'язку (рис. 1.2). На цій схемі представлені такі засоби:

- Пер1 – перетворювач повідомлення в сигнал;
- Пер2 – перетворювач сигналу в повідомлення;
- ПрД – передавач;
- ПрМ – приймач;
- ЛЗ – лінія зв'язку.

Крапки А та Б можна обирати довільно, головною умовою лише є проходження сигналу між ними. Джерело повідомлень та передавач у сукупності представляють джерело сигналу для цього каналу. Надходження дискретного сигналу (по рівнях) на вхід каналу та отримання аналогічного на виході, означає, що цей канал є дискретним. Відповідно, вхідні та вихідні сигнали безперервної форми означають, що цей канал є безперервним.

Характеризувати канал зв'язку для передачі інформації можна декількома основними параметрами (ресурсами, які були представлені вище):

- часом роботи каналу зв'язку T_k ;
- частотною смугою пропускання каналів зв'язку ΔF_k ;
- динамічним діапазоном, який характеризується перевищенням середньої потужності сигналу над середньою потужністю завад на виході каналу зв'язку D_k .

$$D_k = \log \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right), \quad (1.8)$$

Добуток основних параметрів каналу зв'язку називають об'ємом (ємністю) каналу зв'язку:

$$V_k = T_k \cdot \Delta F_k \cdot D_k, \quad (1.9)$$

Тепер потрібно звернути увагу на ресурси сигналу, що передається, для подальшого порівняння їх. Наведемо для цього відомі теореми Шеннона, оскільки в них описується не тільки гранична межа каналу зв'язку, а й акцентується уваги на надійності передачі інформації. Саме з точки зору

надійності розглянути взаємозалежності ресурсів сигналу, які знадобляться для передачі.

Саме з позиції надійності передачі інформації Шеннон у своїй першій роботі сформував проблему в термінах статичної теорії зв'язку. Для цього він використав ймовірнісні моделі для інформаційних джерел та каналу зв'язку. Застосовуючи ймовірнісний підхід, він знайшов універсальну логарифмічну міру для кількості інформації джерела. Він також показав, що існує деякий граничний показник, що характеризує швидкість передачі інформації по каналу зв'язку, що залежить від величини потужності передавача, ширини смуги пропускання та інтенсивності адитивного шуму, який він назвав пропускну здатністю каналу зв'язку. Наприклад, у випадку адитивного білого (з рівномірним спектром) гаусівського шуму ідеальний частотно-обмежений канал з шириною смуги ΔF_k має пропускну здатність C , біт/с, яка визначається формулою:

$$C = \Delta F_k \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{\Delta F_k \cdot N_0} \right), \quad (1.10)$$

де P_c – середня потужність сигналу;

N_0 – спектральна щільність потужності адитивного шуму;

$\Delta F_k \cdot N_0 = P_{ш}$ – середня потужність шуму.

Значення пропускну здатності каналу C [14] полягає у тому, що якщо інформаційна швидкість (продуктивність) джерела R менша за пропускну здатність $R < C$, то теоретично можливо забезпечити надійну (вільну від помилок) передачу через канал з відповідним кодуванням. З другого боку, якщо $R > C$, то надійна передача неможлива, незалежно від способів обробки сигналу при передачі та прийомі. Таким чином, Шеннон встановив основні обмеження передачі інформації та породив новий напрямок, який тепер зветься теорія інформації [7].

Отже, можна передавати інформацію по каналу з перешкодами без помилок, якщо швидкість передачі інформації:

$$R \leq \Delta F_c \log \left(1 + \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right), \quad (1.11)$$

Розглядаючи формулу 1.10, можна побачити, що при $P_{\text{ш}} > P_c$ канал зв'язку має деяку пропускну здатність. Але для передачі інформації, у цьому випадку, потрібно застосовувати методи фільтрації і завадостійкого кодування. Зменшення потужності перешкод дозволяє ємності каналу зв'язку необмежено зростати (1.10). Однак, реалізація такого каналу зв'язку з необмеженої пропускну здатністю неможлива, оскільки існують апаратурні похибки, які еквівалентно шумам зменшують пропускну здатність каналу. Реальні канали зв'язку зазвичай мають $P_{\text{ш}} \ll P_c$, тому одиницею в (1.10) можна знехтувати.

Тоді, максимальна кількість інформації, яку можна передати по каналу зв'язку за відповідний час T_c :

$$V_c = T_c \cdot \Delta F_c \cdot D_c = T_c \cdot \Delta F_c \cdot \log \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right), \quad (1.12)$$

де T_c – час передачі сигналу,

D_c – міра перевищення потужності сигналу над потужністю перешкод, ΔF_c – ширина спектра сигналу.

Величину $V_c = T_c \cdot \Delta F_c \cdot D_c$ можна уявити та графічно представити у вигляді паралелепіпеда зі сторонами ΔF_c , D_c , T_c . Вона отримала назву об'єм сигналу (рис. 1.3).

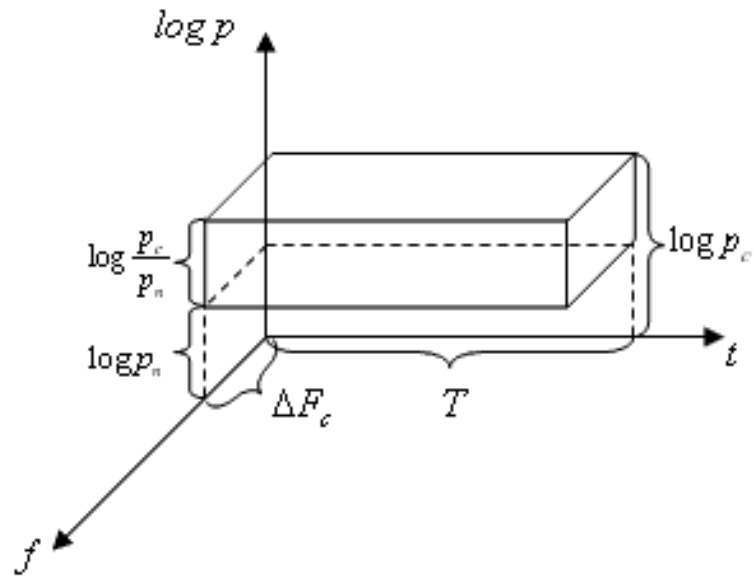


Рисунок 1.3 – Об'єм сигналу

В цілому, об'єм сигналу передбачає собою деяку узагальнену фізичну характеристику сигналу, яка аналогічна поняттю "об'єм каналу" зв'язку V_k (1.9).

Початковою (необхідною але недостатньою) умовою передачі сигналу по каналу зв'язку є:

$$V_k \geq V_c, \quad (1.13)$$

Головними необхідними і вже достатніми умовами є більш жорсткі умови:

$$\Delta F_k \geq \Delta F_c \quad T_k \geq T_c \quad D_k \geq D_c, \quad (1.14)$$

Розглянувши графічне представлення об'єму сигналу (1.9), можна побачити, що є можливість отримання однакового обсягу сигналу шляхом зміни пропорційного відношення параметрів. Тобто, збільшуючи чи зменшуючи один з параметрів потрібно пропорційно збільшувати чи зменшувати будь-який другий відповідно. Дане перетворення необхідно виконувати у разі виконання початкової умови (1.13) та невиконання хоча б

одної головної умови (1.14), коли об'єм сигналу не вміщується в об'ємі каналу.

Користувач сучасної системи зв'язку повинен бути впевнений у якості наданої послуги, яка виражається швидкістю передачі інформації та заданою достовірністю. Головним критерієм якості є достовірність передачі інформації, яка кількісно виражається ймовірності помилкового прийому біта [32, 47]. Відповідно достовірність інформації, що приймається залежить від ресурсів каналу зв'язку.

Розглянемо як кожен з наведених ресурсів впливає на достовірність передачі інформації.

Спочатку розберемо вплив енергетичного ресурсу. В сучасних системах зв'язку при підвищенні швидкості передачі інформації використовують модуляцію різної кратності для підтримання достовірності передачі інформації. Саме модуляція впливає на ймовірність бітової помилки на виході каналу зв'язку. В деяких випадках високий енергетичний показник (відношення сигнал/шум) з використанням модуляції невисокої кратності, може повністю задовольнити вимоги до якості передавання, а саме, забезпечити необхідну достовірність передачі інформації, навіть, без використання завадостійкого кодування. Однак, таке функціонування системи можна вважати неефективним з позиції кількості переданої інформації. Саме тому при гарному енергетичному показнику варто намагатися використовувати модуляцію вищої кратності, оскільки кількість переданої інформації також важливий показник. Більш детально про вплив модуляції та її зв'язок з енергетичним ресурсом розглянемо у другому розділі.

Наступним ресурсом для розгляду оберімо частотний ресурс. Цей ресурс тісно пов'язаний з енергетичним (1.10), оскільки при його збільшенні зростає швидкість передачі інформації у дискретному каналі зв'язку, але водночас знижується відношення сигнал/шум, що відображує аналіз формули 1.10. Зниження енергетичного ресурсу передбачає собою зростання бітової

ймовірності помилки на виході каналу зв'язку у випадку незмінної модуляції. Таким чином, для забезпечення необхідної якості передачі, тобто заданої достовірності потрібно знижувати кратність модуляції або використовувати інший інструмент – надлишкові коди.

Найефективніше функціонування сучасних систем зв'язку являє собою раціональний вибір кількості розглянутих ресурсів для вибору параметрів системи передачі і задоволення вимог щодо швидкості передачі інформації при підтриманні необхідної якості, а саме заданої достовірності передачі інформації. Реалізація цієї мети вимагає використовувати одночасно теорію завадостійкості та теорію інформації [26].

Тепер розберемо за допомогою яких телекомунікаційних технологій сучасні системи зв'язку задовольняють потреби споживачів та яку кількість ресурсів вони для цього використовують. Наразі, для задоволення споживачів розвиваються такі технології:

- бездротової локальної мережі з пристроями на основі стандартів IEEE 802.11 (Wireless Fidelity – Wi-Fi);
- мобільний зв'язок (4G, 5G, 6G);
- дротовий зв'язок (волоконно-оптичні лінії зв'язку – ВОЛЗ).

Розберемо для прикладу технологію Wi-Fi. Сама по собі технологія Wi-Fi існує з кінця 90-х років, але в останнє десятиліття вона стала значно краще. По-перше, щоб відмінності між поколіннями були зрозуміліше, організація Wi-Fi Alliance нещодавно перейшла на більш традиційний принцип присвоєння імен, замінивши формат 802.XX спрощеним числовим суфіксом. Спрощена назва (Wi-Fi 6 замість 802.11ax) дозволяє легко визначити покоління технології, що використовується, і сумісність з пристроями, що підтримують цю версію. На сьогодні ця технологія представлена на масовому ринку для споживачів у вигляді шостого покоління. Wi-Fi 6 значно перевершує технології попередніх поколінь, хоча середній користувач може не відразу помітити різницю. Ці зміни не роблять революцію в області бездротових маршрутизаторів і бездротових мереж, але

містять безліч удосконалень, які в комплексі забезпечують істотне поліпшення.

Перше серйозне зміна в Wi-Fi 6 – підтримка потенційно більш високих швидкостей підключення, що означає більшу кількість затребуваного частотного ресурсу для функціонування. Підвищення швидкості Wi-Fi означає підвищення швидкості вивантаження і завантаження даних за рахунок збільшення пропускної здатності в технології Wi-Fi 6. Це дуже важливо, оскільки розміри файлів постійно ростуть, так само як і вимоги до пропускної здатності для трансляції відео з високою роздільною здатністю, як і онлайн-ігор з високим навантаженням на мережу. Щоб грати в online-гру і при цьому вести трансляцію, наприклад, на платформі Twitch, потрібна велика пропускна здатність, а також надійне і стабільне з'єднання.

Розберемо наскільки технологія Wi-Fi 6 є швидшою на відміну від минулого покоління:

- В багатоканальному режимі максимальна пропускна здатність Wi-Fi 6 може становити 9,6 Гбіт/с, коли аналогічний показник в технології минулого покоління, а саме Wi-Fi 5, становить не більше 3,5 Гбіт/с. Це теоретичні максимальні значення, але в реальних умовах локальні мережі можуть і не досягати такої швидкості. Однак цей максимум ділиться між усіма підключеними пристроями, так що пристрої з Wi-Fi 6 все одно стануть працювати істотно швидше, навіть якщо і не досягнуть максимальної можливої швидкості. Цей поділ між пристроями вже може дати висновок, що кількість підключених одночасно пристроїв зростає;

- Швидкість може бути вище в порівнянні з Wi-Fi 5. Це передбачає, що використовується маршрутизатор Wi-Fi з одним пристроєм. Технологія Wi-Fi 6 може забезпечити підвищення швидкості передачі даних за рахунок поєднання ряду методик, включаючи більш ефективне кодування даних та інтелектуальний використання ресурсів бездротового спектра, що стало можливим завдяки більш потужним процесорам;

– З технологією Wi-Fi 6 час затримки зменшиться на величину до 75%. Це досягається за рахунок більш ефективної обробки великих обсягів мережевого трафіку. Для геймерів це означає більш швидке завантаження ігор, більш високу швидкість вивантаження трансляцій ігрового процесу і більш надійну роботу в умовах багатозадачності;

– Технологія Wi-Fi 6 робить провідні та безпроводні сигнали ближчими за швидкістю. Це потенційно може звільнити ще більше користувачів від апаратних обмежень їх модемів. Багато геймери і автори контенту підключаються безпосередньо до маршрутизаторів або мережевих комутаторів замість того, щоб використовувати переваги гнучкості бездротових мереж. Wi-Fi 6 допомагає ще більше зменшити розрив у швидкості між дротяними і бездротовими мережами.

У більшості будинків сьогодні використовується набагато більше пристроїв з підтримкою Wi-Fi, ніж п'ять років тому. До смартфонів, планшетів і телевізорів додалися пристрої Інтернету речей, такі як термостати, дверні дзвінки і багато іншого. Сьогодні практично будь-який пристрій може підключатися до бездротового маршрутизатора. Технологія Wi-Fi 6 підвищує ефективність одночасного підключення декількох пристроїв і оптимізує пріоритети трафіку цих пристроїв.

Множинний доступ з ортогональним частотним розділенням (OFDMA) – одна з технологій, що дозволяють добитися цього. Методика OFDMA ділить канали на кілька несучих, що дозволяє вести передачу на кілька приймачів (кінцевих пристроїв) одночасно. Маршрутизатор Wi-Fi 6 може відправляти різні сигнали в рамках одного вікна передачі. Завдяки цьому маршрутизатор може взаємодіяти з декількома пристроями в рамках одного циклу передачі, так що окремим пристроям не потрібно чекати своєї черги, поки маршрутизатор зможе передати їм дані по мережі.

У традиційних мережах Wi-Fi (рис.1.4(a)) пристрої можуть бути змушені очікувати, поки клієнт відправить або отримає дані в мережі з великою кількістю пристроїв. Мережі з технологією OFDMA (рис.1.4(б))

дозволяють обслуговувати більше пристроїв в один і той же проміжок часу, що підвищує ефективність зв'язку в умовах використання великої кількості пристроїв.

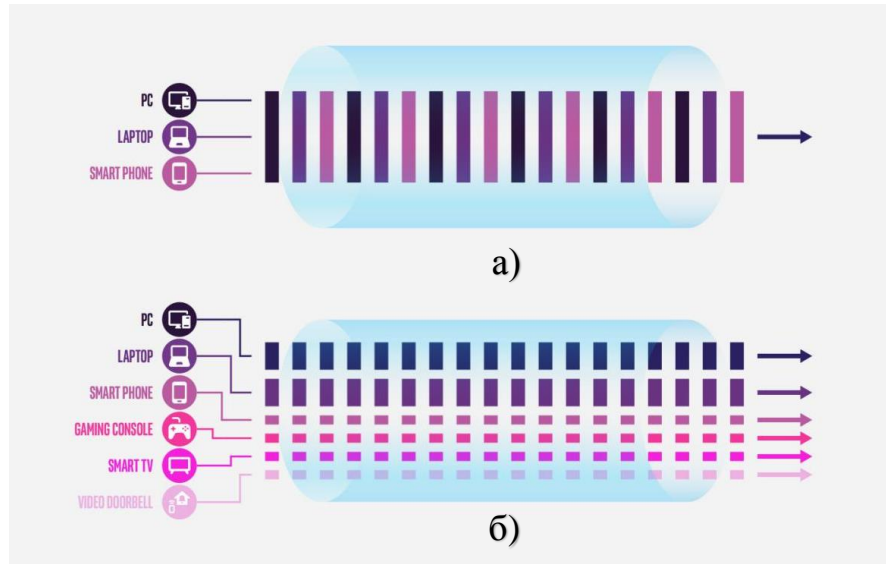


Рисунок 1.4 – Приклад застосування технології OFDM

Перекриваючі набори базових послуг (OBSS) – ще одна особливість Wi-Fi 6, яка може поліпшити ситуацію в перевантажених мережах. У старіших версіях Wi-Fi при підключенні до мережі пристрої прослуховували канал на наявність перешкод, перш ніж відправляти по ньому дані.

Якщо на каналі були присутні перешкоди, навіть від віддаленої мережі, пристроїв доводилося чекати звільнення каналу від перешкод, перш ніж починати передачу. OBSS дозволяє точці доступу використовувати так звані «кольори» для унікальної ідентифікації мережі. При виявленні на каналі іншого трафіку, колір якого відрізняється від кольору локальної мережі, пристрої можуть ігнорувати його і продовжувати передачу. За рахунок цього підвищується надійність і скорочується час затримки.

Поєднання OFDMA і OBSS підвищує загальну ефективність передачі даних в завантажених мережах. Оскільки зараз все більше пристроїв використовують Wi-Fi, це допомагає зберегти швидкість і стабільність підключень.

Формування променів – ще одна поліпшена в Wi-Fi 6 технологія, що дозволяє підвищити швидкість передачі. Цей футуристичний метод передачі даних насправді дуже простий. Замість передавання даних у всіх напрямках маршрутизатор визначає місцезнаходження запитувача дані пристрої і направляє більш локалізований потік даних в цьому напрямку.



Рисунок 1.5 – Приклад принципу формування (направлення) променів

Звичайні маршрутизатори Wi-Fi (рис.1.5(а)) передають бездротової сигнал у всіх напрямках. Технологія формування променів (рис.1.5(б)) дозволяє націлювати сигнал на кінцеві пристрої, за рахунок чого досягається більш висока швидкість підключення.

Звісно, технологія формування (направлення) променів з'явилася до покоління Wi-Fi 6, проте в цьому поколінні її ефективність була значно збільшена.

Також варто відмітити переваги мережі окрім збільшення швидкості передачі. Передача інформації з відповідною якістю включає в себе її захист від спотворень та викрадень. Технологія Wi-Fi 6 також включає ряд поліпшень в області безпеки.

Широко використовується протокол безпеки Wi-Fi Protected Access (WPA) використовує паролі для шифрування. В Wi-Fi 6 може використовуватися WPA3. Якщо для підключення до мережі Wi-Fi потрібно

пароль, в ній використовується WPA. Стандарт WPA2 використовується вже давно, але технологія Wi-Fi 6 змінить це.

Зокрема, захист пароля підвищена за рахунок системи Dragonfly Key Exchange, що працює за принципом SAE (одночасна аутентифікація рівноправних вузлів). Цей метод аутентифікації ускладнює злом паролів за рахунок використання більш складного методу підключення до мережі Wi-Fi. Додатковий рівень безпеки і посилене шифрування зроблять мережі Wi-Fi надійніше, ніж будь-коли раніше. Цей додатковий рівень безпеки – відмінний приклад позитивних змін в Wi-Fi 6 без негативного впливу на зручність роботи користувачів.

Також в Wi-Fi 6 реалізована функція цільового часу пробудження (TWT), що дає можливість збільшення часу автономної роботи деяких пристроїв. Дана технологія підвищує ефективність взаємодії маршрутизатора і пристрою щодо переходу в режим сну або пробудження. З'єднання з радіопередавачем Wi-Fi на пристрої активується тільки тоді, коли пристрій повинен бути в активному режимі, і тому пристрій витрачає менше часу і енергії на пошук бездротового сигналу. Це дає можливість збільшення часу автономної роботи.

На додаток до Wi-Fi 6 нещодавно з'явилася нова технологія Wi-Fi 6E. Раніше пристрої Wi-Fi могли використовувати тільки частотні діапазони 2,4 ГГц і 5 ГГц, але нещодавно це змінилося. Пристрої з підтримкою Wi-Fi 6E можуть використовувати частотний діапазон 6 ГГц з шириною смуги пропускання 1200 МГц, що робить його ідеальним для передачі великих обсягів даних на невеликі відстані. Це може допомогти знизити перевантаження трафіку і взаємні перешкоди підтримуваних пристроїв. Wi-Fi 6E можна уявити як додавання нової широкої смуги на двухсмугову магістраль Wi-Fi з усіма перевагами Wi-Fi 6.

Для узагальнення всього вищесказаного приведемо таблиці порівняння різних поколінь технології Wi-Fi з метою формування коротких висновків щодо використання ресурсів каналу зв'язку технологією Wi-Fi 6.

Таблиця 1.2 – Порівняння швидкостей передачі інформації сімейства технології Wi-Fi

Покоління (стандарт IEEE)	Частота, ГГц	Максимальна швидкість з'єднання, Мбіт/с	Рік
Wi-Fi 6 (802.11ax)	2,4/5	600-9608	2019
Wi-Fi 5 (802.11ac)	5	433-6933	2014
Wi-Fi 4 (802.11n)	2,4/5	72-600	2009

За таблицею 1.2, можна побачити, що з кожною технологією максимальна швидкість передачі зростає. Це означає, що використовується більше частотного ресурсу для передачі та відповідно погіршується залежний від нього – енергетичний ресурс. Саме тому в стандартах цих телекомунікаційних технологій наведені відповідні параметри модуляції та надлишкових кодів, які у поєднанні дозволяють встановити високоякісних бездротовий зв'язок (табл.1.3).

Таблиця 1.3 демонструє, що система зв'язку яка працює відповідно за стандартом Wi-Fi 6 може функціонувати майже у 90-а режимах роботи. Через це система є функціонально гнучкою і може підлаштовуватися згідно поставлених до неї вимог. При такій кількості конфігурацій водночас збільшується коефіцієнт ефективного використання ресурсів каналу зв'язку.

Можна побачити, що стандарт Wi-Fi підтримує модуляцію типу КАМ-1024, що підвищує кількість переданої інформації за одиницю часу дуже суттєво. При цьому підвищується темп кодування для забезпечення необхідної якості передачі.

Таблиця 1.3 – Швидкість передачі в залежності від вибору параметрів для стандарту Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax)

Схеми модуляції та кодування для одного просторового потоку										
MCS індекс	Тип модуляції	Темп кодування	Швидкість передачі даних, (Мбіт/с)							
			Канали 20 МГц		Канали 40 МГц		Канали 80 МГц		Канали 160 МГц	
			1600 нс GI	800 нс GI	1600 нс GI	800 нс GI	1600 нс GI	800 нс GI	1600 нс GI	800 нс GI
0	BPSK	1/2	4	8,6	8	17,2	17	36	34	36
1	QPSK	1/2	16	17	33	34	68	72	136	144
2	QPSK	3/4	24	26	49	52	102	108	204	216
3	16-QAM	1/2	33	34	65	69	136	144	272	282
4	16-QAM	3/4	49	52	98	103	204	216	408	432
5	64-QAM	2/3	65	69	130	138	272	288	544	576
6	64-QAM	3/4	73	77	146	155	306	324	613	649
7	64-QAM	5/6	81	86	163	172	340	360	681	721
8	256-QAM	3/4	98	103	195	207	408	432	817	865
9	256-QAM	5/6	108	115	217	229	453	480	907	961
10	1024- QAM	3/4	122	129	244	258	510	540	1021	1081
11	1024- QAM	5/6	135	143	271	287	567	600	1134	1201

1.3 Аналіз відомих досліджень щодо вирішення проблеми надання високоякісного зв'язку при умовах сталості продуктивності чи швидкості джерела повідомлень та використанні додаткового частотного ресурсу

Проведення аналізу досліджень вирішення проблеми надання високоякісного зв'язку при використанні додаткового частотного ресурсу вимагає наведення аналогічного аналізу при умові обмеженого ресурсу.

Реальна телекомунікаційна система при проектуванні з обмеженим ресурсом передбачає застосування завадостійких кодів [23] та ретельного

підходу до вибору виду модуляції для забезпечення можливості надання високоякісного зв'язку. Використання завадостійких кодів обумовлено їх можливістю знаходити та виправляти помилки, тим самим забезпечувати задану достовірність, а саме підтримувати ймовірність бітової помилки на виході каналу зв'язку на заданому рівні.

Сучасні телекомунікаційні системи використовують саме такий спосіб вирішення даної проблеми. Прикладом може слугувати таблиця 1.3, яка показує, що система при будь-яких налаштуваннях завжди має відповідну схему кодування та вид модуляції, і це означає, що без них вона не функціонує.

При цьому застосування завадостійких кодів передбачає собою зменшення корисної швидкості передачі інформації, оскільки пропускна здатність одночасно використовується для передачі повідомлень джерела та надлишкових повідомлень. Тому вибір параметрів кодування повинен бути обумовлений максимально можливою швидкістю передачі повідомлень, тобто максимально наближеною до границі Шеннона [44, 45].

Однак, проблема потребує вирішення, і саме для цього були розроблені такі інструменти: біноміальна модель генерації помилок у бінарному каналі, методика аналізу завадостійких можливостей блокових та неперервних кодів та розроблена методика синтезу блокових завадостійких кодів, за яких відбувалось максимальне зближення з границею Шеннона [44, 45].

Біноміальна модель допомагає сформулювати вимоги щодо виправної здатності блокових завадостійких кодів, які повинні забезпечити задану достовірність передачі, яка виражається ймовірністю бітової помилки на виході декодера.

Методика аналізу завадостійких можливостей [41, 42] застосовується для оцінки завадостійких можливостей шляхом використання двох завадостійких границь кодування – Плоткіна та Варшамова-Гільберта [36]. Наближення до границі Варшамова-Гільберта передбачає собою можливість визначення параметрів реальних блокових кодів, а наближення до границі

Плоткіна означає визначення параметрів найкращих за можливостями кодів. Коди параметри яких знаходяться за границею Плоткіна не існують.

Блокові завадостійкі коди [34] синтезуються у два етапи: передусім знаходять параметри найкращого (потенційно можливого) завадостійкого коду, а вже потім обирають параметри реально існуючого коду, які намагаються максимально наблизити до параметрів найкращого коду.

В умовах обмежених ресурсів дана методика є ефективною для використання, оскільки дозволяє виконувати такі поставлені завдання:

- економити ресурс;
- раціонально надавати ресурс споживачу;
- задовольнити вимоги споживача щодо достовірності передачі інформації при якомога мінімальній втраті у швидкості передачі інформації;
- збільшити показники ефективності системи передачі.

Вирішення проблеми в умовах обмежених ресурсів за допомогою представленої методики передбачало за собою зниження корисної швидкості передачі. Це у свою чергу, означає, що використання даної методики при умові розширення ресурсів дозволяє вирішити саме проблему зі зниженням корисної швидкості передачі. Водночас потрібно завжди пам'ятати про взаємозв'язок частотного ресурсу з енергетичним, оскільки при збільшенні першого – другий знижується. В такому випадку вплив модуляції дуже суттєвий, оскільки зниженням її кратності можна уникнути впливу попереднього процесу з розширення частотного ресурсу, а саме, забезпечити необхідну достовірність передачі інформації.

Описана методика у цьому пункті є гнучкою і дозволяє визначати параметри системи передачі інформації не залежно від поставлених умов щодо ресурсів каналу зв'язку. Саме тому, дослідження у даній роботі будуть проводитися з використанням цієї методики.

1.4 Постановка завдання дослідження

Метою дослідження являється формування методики підтримання сталої швидкості передавання інформації джерела в каналі зв'язку при обмежених частотно-енергетичних ресурсах з відповідними рекомендаціями щодо вибору параметрів кодування та вибору типу модуляції.

Згідно мети роботи основними задачами є:

1) обґрунтування актуальності дослідження методики забезпечення заданої достовірності передачі інформації при застосуванні блокових завадостійких кодів;

2) аналіз впливу ресурсів каналу зв'язку на поставлені вимоги щодо достовірності передачі інформації під час процесу збільшення швидкості передачі даних;

3) аналіз впливу параметрів надлишкових кодів та виду модуляції на забезпечення заданої достовірності при умові розширення частотного ресурсу;

4) аналіз методики забезпечення заданої достовірності на основі вибору параметрів блоку коду та типу модуляції при зміні частотної смуги передачі;

5) опис способу вирішення проблеми надання високоякісного зв'язку при умові незмінної продуктивності джерела повідомлень та використанні додаткового частотного ресурсу;

6) вирішення задачі забезпечення заданої достовірності без зміни швидкості джерела повідомлень при зміні частотної смуги передачі;

7) аналіз впливу зміни кратності модуляції з подальшим розширенням частотної смуги передачі на поставлені умови щодо достовірності передачі та незмінності продуктивності джерела повідомлень;

8) опис методики забезпечення заданої достовірності на основі вибору параметрів блоку коду та типу модуляції за умови сталої продуктивності джерела повідомлень при зміні частотної смуги передачі;

9) формування комплексного графічного опису методики шляхом відображення взаємозв'язків між використаними у дослідженні інструментами для вирішення поставленої задачі.

Об'єктом дослідження є властивість джерела повідомлень підтримувати сталу швидкість передавання інформації шляхом вибору необхідних параметрів системи передачі.

Предметом дослідження являються способи вирішення проблеми надання високоякісного зв'язку при умові незмінної продуктивності джерела при зміні частотної смуги передачі.

Магістерська дипломна робота присвячена дослідженням з поєднанням сфер теорії інформації та теорії завадостійкості для формування методики визначення параметрів системи передачі які задовольняють вимоги щодо достовірності передачі інформації при використаних додаткових частотних ресурсах. Також розглядаються можливості завадостійких кодів і взаємозв'язок та вплив ресурсів каналу зв'язку на достовірність передачі інформації. Водночас розглядаються базові параметри модуляції та кодування, оскільки вони є головними інструментами у дослідженні. Більш детально розглядаються параметри самих кодів: довжина блоку коду, виправна здатність коду і швидкість кодування. Дуже ретельно будуть розглянуті можливості блокового кодування при розширенні спектральних характеристик джерела повідомлень.

Дослідження передбачає використовувати такі головні інструменти: біноміальну модель генерації помилок у бінарному каналі зв'язку та методику аналізу завадостійких можливостей блокових кодів.

Цільовою установкою буде опис сформованої методики визначення параметрів системи передачі відповідно до вимог, щодо достовірності передачі інформації і сталої швидкості передавання джерела повідомлень, з чітким алгоритмом дій та комплексним графічним відображенням для побудови у концепті номограми.

Висновки з розділу 1

1. Головним параметром джерела повідомлень є продуктивність яка характеризується кількістю виданої інформації джерелом за одиницю часу.
2. Головним напрямком розвитку систем передачі є збільшення швидкості передачі інформації яке передбачає збільшення кількості виданої інформації джерелом.
3. Ресурси каналу зв'язку, що використовуються для передачі інформації виданої джерелом повідомлень є обмеженими та впливають на якість переданої інформації.
4. Для забезпечення якості переданої інформації по каналу зв'язку застосовується завадостійке кодування яке забезпечує необхідну достовірність переданої інформації. Параметри завадостійкого кодування визначаються за допомогою біноміальної моделі генерації помилок у каналі зв'язку та методики аналізу завадостійких можливостей блокових кодів.
5. Метою дослідження являється формування методики підтримання сталої швидкості передавання інформації джерела в каналі зв'язку при обмежених частотно-енергетичних ресурсах, підтримуючи задану достовірність передачі інформації.

2 АНАЛІЗ ВПЛИВУ ІНСТРУМЕНТІВ ПІДТРИМАННЯ ВИСОКОЯКІСНОГО ЗВ'ЯЗКУ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ ДЖЕРЕЛА ПОВІДОМЛЕНЬ

2.1 Взаємозв'язок ресурсів каналу зв'язку та результуючої продуктивності джерела повідомлень

Наведені у минулому розділі ресурси каналу зв'язку (частотний, енергетичний, часовий, просторовий та інформаційний) можна представляти у вигляді певних показників функціонування систем передачі.

В даному дослідженні головним ресурсом є частотний, оскільки його зміна викликає ланцюгову реакцію змінюючи показники інших ресурсів каналу зв'язку. Частотний ресурс представлено у вигляді смуги займаних частот ΔF , показник якої прямо пропорційний каналній швидкості передачі даних V_c :

$$V_c, \left[\frac{\text{СИМВ}}{\text{сек}} \right] = \Delta F, [\text{Гц}], \quad (2.1)$$

Одночасне застосування формул 1.3 та 2.1 дозволяє представити показник енергетичного ресурсу певним чином:

$$h^2 = \frac{P_c}{V_c \cdot N_0}, \left[\frac{\text{Вт}}{\frac{\text{СИМВ}}{\text{сек}} \cdot \frac{\text{Вт}}{\text{Гц}}} = \text{раз} \right], \quad (2.2)$$

де h^2 – інтегральний показник, що відображає зв'язок просторових та енергетичних параметрів каналу зв'язку [3, 35]. У загальному це співвідношення сигнал/шум. Застосування у розрахунках передбачає вираження показника у кількості разів, але побудовані графіки та залежності будемо наводити, виражаючи цей показник у децибелах;

P_c – середня енергія сигналу в точці прийому;

N_0 – одностороння спектральна потужність шуму.

Також варто навести показник α , який пов'язує енергетичні показники характеристики сигналу та завади:

$$\alpha = \frac{P_c}{N_0}, [\mu\text{с}^{-1}], \quad (2.3)$$

Даний показник α – є масштабованою величиною. У цьому дослідженні його розмірність – це мікросекунди, оскільки розрахунки показників системи передачі проводяться на мегабітних швидкостях.

Наразі формулу 2.2 можна представити у вигляді:

$$h^2 = \frac{\alpha}{V_c}, \quad (2.4)$$

Представлені формули 2.1-2.4 відображують взаємозв'язок частотного і енергетичного ресурсу та дозволяють провести аналіз щодо впливу цих ресурсів на забезпечення заданої достовірності передачі та результуючу продуктивність джерела повідомлень.

В першу чергу розглянемо саме взаємозв'язок частотного та енергетичного ресурсу. Для цього наведемо відповідне графічне відображення залежності представленої формулою 2.4 при $\alpha = 250, 500, 750, 1000 [\mu\text{с}^{-1}]$ (рис. 2.1).

Розглядаючи рисунок 2.1, можна побачити, що незалежно від початкових умов, збільшення частотного ресурсу у вигляді каналної швидкості передачі V_c передбачає собою зменшення енергетичного ресурсу у вигляді інтегрального показника h^2 . При цьому більший показник α означає збільшений запас енергетичного ресурсу або кращу варіативність вибору смуги займаних частот (каналної швидкості передачі). Варто пам'ятати, що енергетичний ресурс має суттєвий вплив на достовірністю передачі інформації.

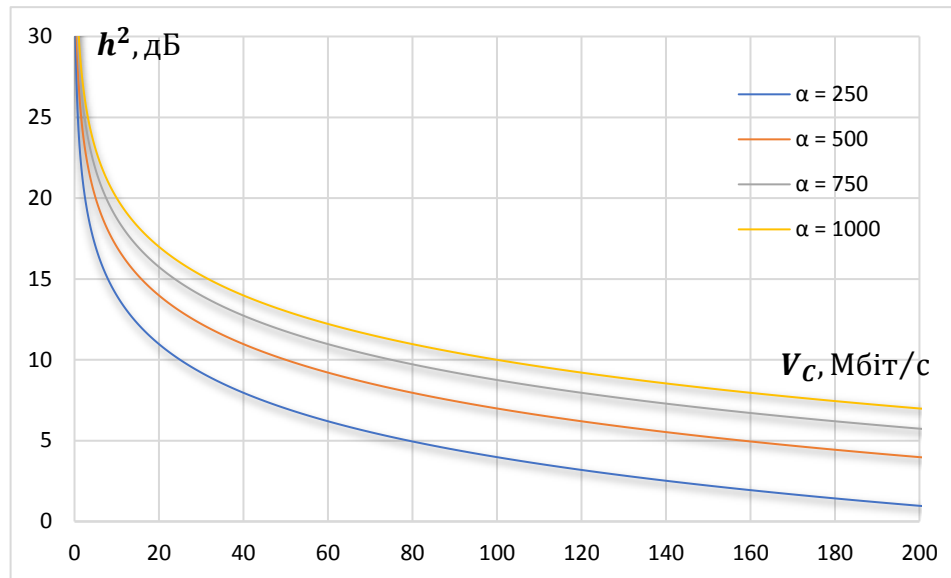


Рисунок 2.1 – Взаємозв'язок енергетичного та частотного ресурсу

Наступним кроком проаналізуємо вплив енергетики каналу на достовірність передачі інформації, яка згідно вищесказаного у пункті 1.2, виражається показником ймовірності помилки на виході каналу зв'язку. Цей показник може бути двох типів: символною ймовірністю помилки та бітовою ймовірністю помилки. Оскільки у дослідженні використовувалася модуляція виду КАМ-М, то формули для визначення цього показника матимуть вигляд [7, 37, 38]:

$$p_{\text{сим}} = 1 - \left(1 - 2 \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \cdot \log_2(M)}{M-1} \cdot h^2 [\text{раз}]} \right) \right), \quad (2.5)$$

$$p_6 = \frac{2}{\log_2(M)} \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \cdot \log_2(M)}{2 \cdot (M-1)} \cdot h^2 [\text{раз}]} \right), \quad (2.6)$$

Використовуючи ці формули побудуємо графіки залежностей обох типів ймовірності помилки від енергетичного показника h^2 . Побудову виконаємо на прикладі модуляції виду КАМ-16.

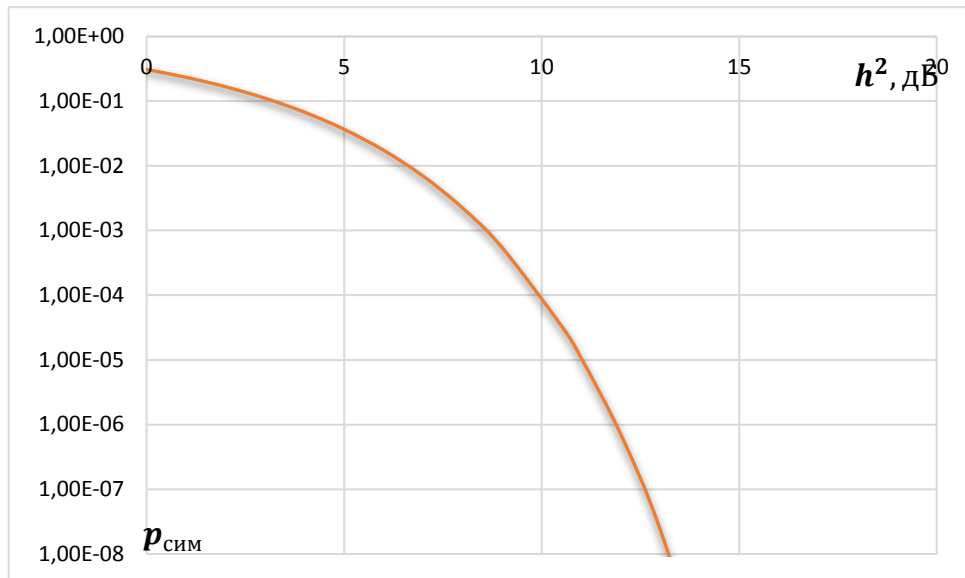


Рисунок 2.2 – Символьна ймовірність помилки

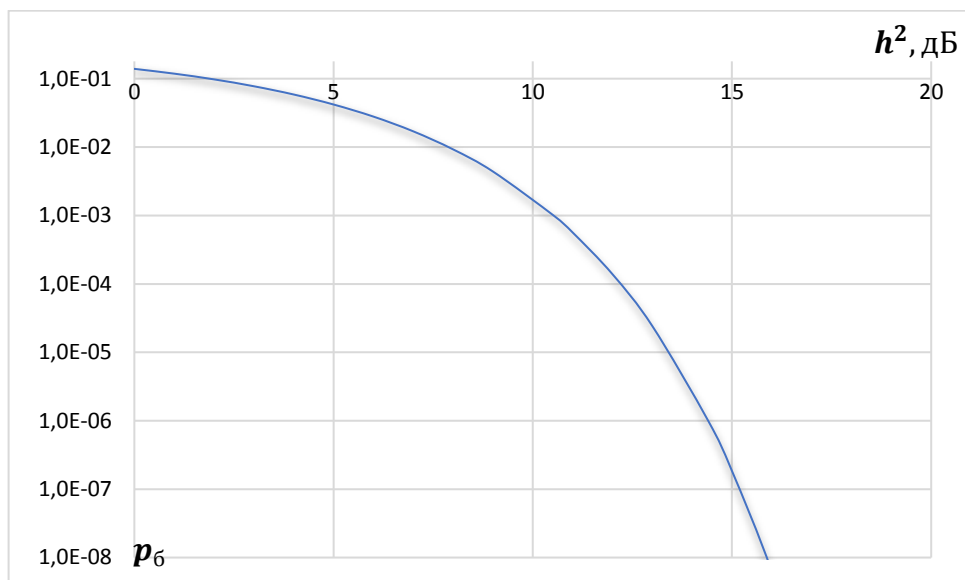


Рисунок 2.3 – Бітова ймовірність помилки

Залежності дають зрозуміти, що зниження ймовірності помилки обумовлене погіршенням (зменшенням) енергетичного ресурсу каналу зв'язку. З іншого боку, збільшення енергетичного ресурсу каналу зв'язку означає покращення достовірності передачі інформації. При цьому підтримка високого енергетичного показника передбачає собою використання дорогого обладнання та відповідного каналу зв'язку. Саме через це енергетичний

ресурс найчастіше вважається обмеженим при проектуванні нової або модифікації наявної системи передачі інформації.

Проведення даного дослідження в умовах розширення частотного ресурсу означає апріорне зменшення енергетичного ресурсу. Потрібно навести залежність достовірності передачі інформації від частотного ресурсу. Побудуємо залежність ймовірності бітової помилки на виході каналу зв'язку p_b від каналної швидкості передачі V_c , використовуючи такі параметри: $\alpha = 250, 500, 750, 1000$ [$\mu\text{с}^{-1}$] та модуляція КАМ-16.

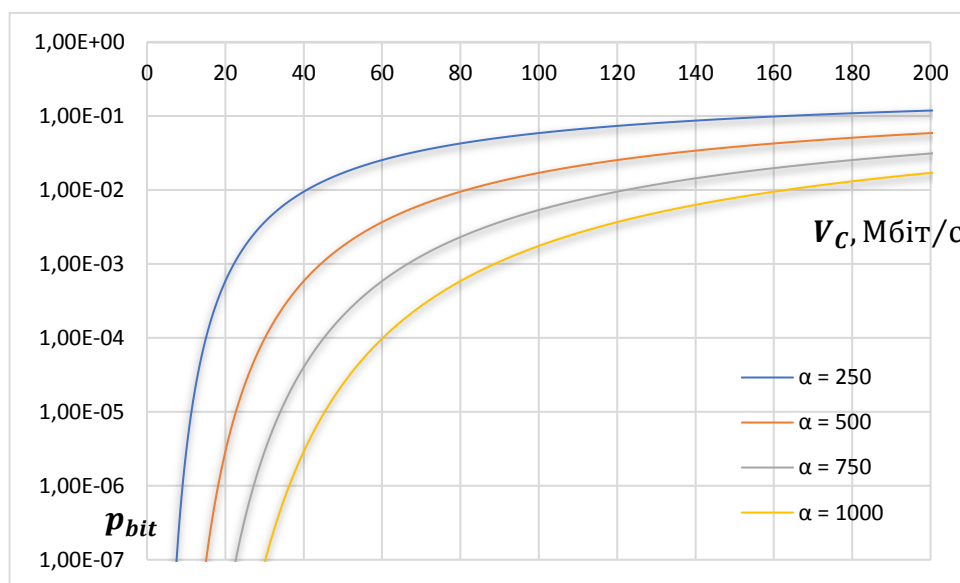


Рисунок 2.4 – Залежність достовірності передачі від частотної смуги передачі

Графік вище відображує падіння достовірності передачі інформації при збільшенні швидкості передачі інформації, а це не є позитивною рисою. У межах цього дослідження це є дуже важливим фактором, оскільки для досягнення поставлених вимог щодо сталості продуктивності потрібно збільшувати частотний ресурс та апріорі втрачати у достовірності, тобто погіршувати цим бітову ймовірність помилки. Також на графіку варто відмітити характер зміни зростання ймовірності помилки. Початок характеристики зростання ймовірності помилки є дуже різким і вплив процесу збільшення каналної швидкості є суттєвим, а з плином часу, вплив

цього процесу на ймовірність помилки на біт на виході каналу зв'язку стає меншим. Водночас з частотним ресурсом відбувається зміна енергетичного ресурсу. Вимогою до якості передачі інформації є достовірність передачі інформації виражена ймовірністю бітової помилки на рівні $P_6 = 10^{-6}$. У зв'язку з цим, графік відображує можливість здійснення передачі інформації з заданою достовірністю при приблизних канальних швидкостях 10 Мбіт/с, 19 Мбіт/с, 29 Мбіт/с та 37 Мбіт/с з відповідними показниками енергетичного ресурсу $\alpha = 250, 500, 750, 1000 [\mu\text{с}^{-1}]$. Однак, потрібно детально прораховувати доцільність збільшення ресурсів системи передачі щодо можливо одержаного результату. Кодування при передачі по каналу зв'язку у таких умовах можна не використовувати. Але недостача достовірності завжди може бути компенсована застосуванням завадостійкого кодування.

Результатом визначення усіх вищенаведених параметрів може стати визначення продуктивності джерела повідомлень без кодування, яку можна представити формулою:

$$R = V_c \cdot \log_2 M \cdot (1 + p_{\text{біт}} \log_2 p_{\text{біт}} + (1 - p_{\text{біт}}) \log_2 (1 - p_{\text{біт}})), \quad (2.7)$$

Проведемо аналіз впливу частотного та енергетичного ресурсу на продуктивність джерела повідомлень при модуляції КАМ-16. Для цього використаємо формулу 2.9 для побудови відповідних графічних залежностей на рисунках 2.5 та 2.6.

При аналізі графіків на рисунках 2.5 та 2.6, можна побачити, що взаємозв'язок частотного та енергетичного ресурсу аналогічно впливає і на продуктивність. Тобто, збільшення частотного ресурсу передбачає собою збільшення продуктивності джерела повідомлень (рис. 2.5), але водночас (відповідно до рис. 2.1) зменшується енергетичний ресурс при аналогічному характері зміни продуктивності джерела повідомлень (рис. 2.6).

В цьому випадку досягнення великої каналної швидкості передачі є негативною рисою, оскільки при цьому енергетика у каналі зв'язку дуже низька та ймовірність бітової помилки висока. Іншими словами, більшу частину переданої інформації неможливо буде відновити на приймальній стороні та знадобиться повторне надсилання цієї інформації, що є нераціональним використанням ресурсів каналу зв'язку.

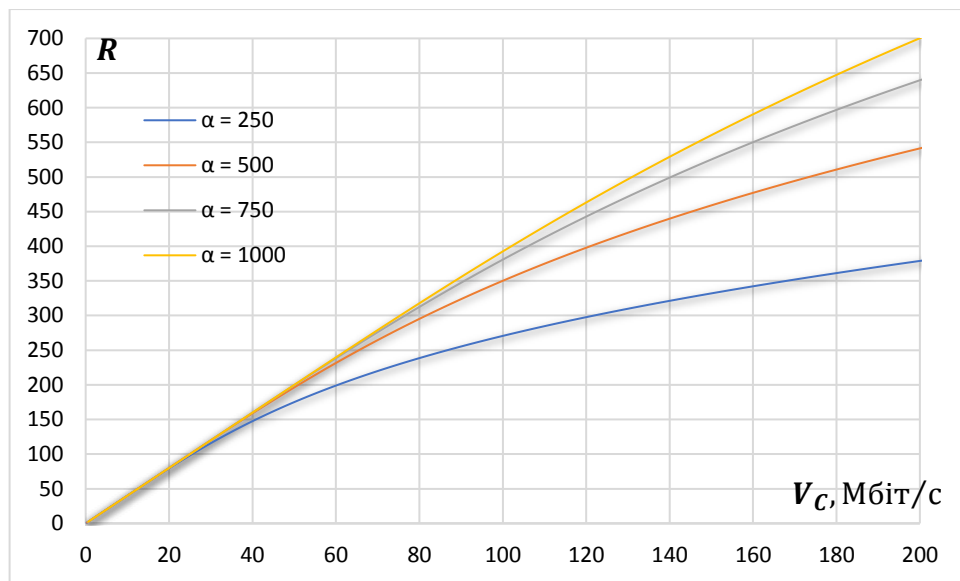


Рисунок 2.5 – Залежність продуктивності від частотного ресурсу

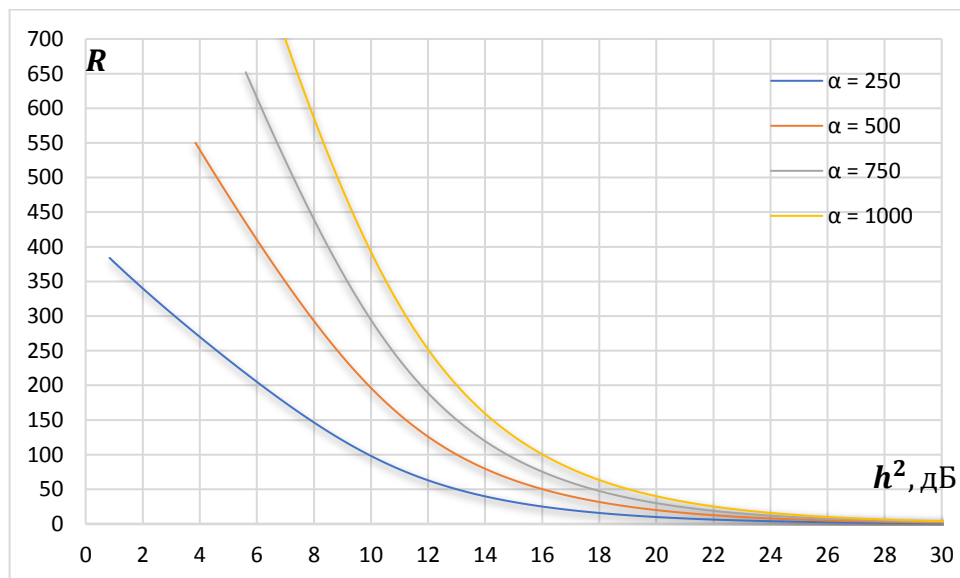


Рисунок 2.6 – Залежність продуктивності від енергетичного ресурсу

У випадку коли незадовільна швидкість передачі обумовлює розширення частотного ресурсу системи передачі необхідно використовувати інші методи забезпечення достовірності: обирати відповідний тип модуляції та застосовувати надлишкові коригуючі коди [15].

2.2 Аналіз впливу типу модуляції та параметрів блокових кодів на забезпечення заданої достовірності при використанні додаткових ресурсів каналу зв'язку

2.2.1 Аналіз впливу типу модуляції на параметри системи зв'язку

У висновку попереднього пункту було відмічено, що використання додаткового ресурсу каналу зв'язку передбачає використання таких методів для забезпечення необхідної достовірності передачі: раціональний вибір типу модуляції та застосування надлишкових завадостійких кодів [15]. Саме тому у цьому пункті розберемо вплив цих інструментів на забезпечення заданої достовірності передачі інформації.

Першим інструментом для забезпечення достовірності розглянемо модуляцію. Головний параметр модуляції, який істотно впливає на початкову ймовірність помилки – це кратність модуляції. При цьому початкова ймовірність помилки обумовлює собою стартову умову для знаходження коригуючих характеристик коду. Також кратність модуляції впливає на продуктивність джерела повідомлень, оскільки вища кратність означає більшу кількість інформації, що передається, та навпаки.

Застосування багатопозиційної модуляції надає можливість виконувати передачу даних, коли в одному повідомленні дві і більше одиниці. Наслідком цього є зростання швидкості передачі у каналі зв'язку.

В першу чергу проведемо аналіз впливу кратності модуляції на бітову ймовірність помилки, використовуючи формулу 2.6, яка передбачає визначення показника достовірності для модуляцій виду КАМ-М.

Побудуємо графічне відображення залежності бітової ймовірності помилки на виході каналу зв'язку від кратності модуляції та проведемо детальний аналіз [16].

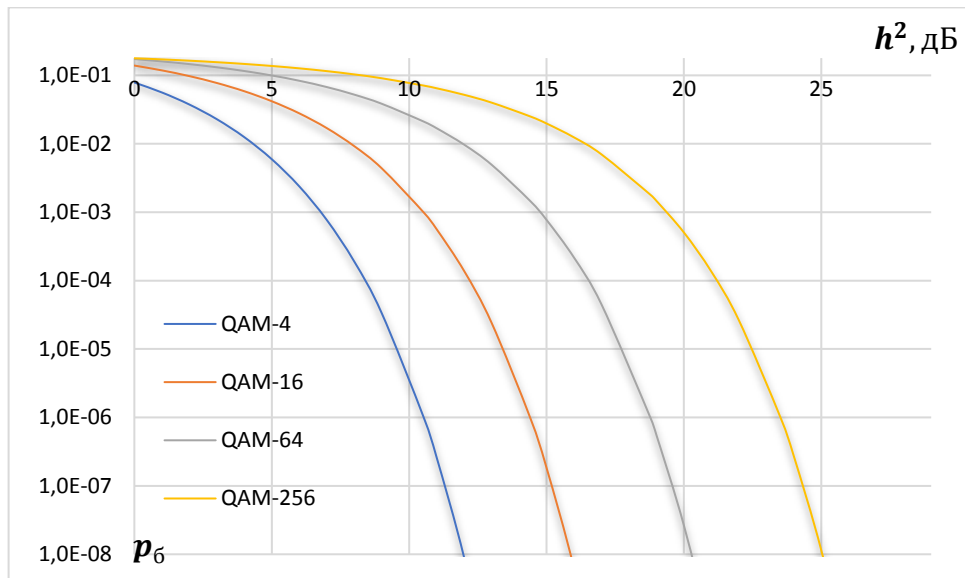


Рисунок 2.7 – Залежність достовірності від параметру кратності модуляції

Аналізуючи залежності при фіксованому енергетичному ресурсі, важливо було розуміти, що модуляція меншої кратності забезпечує кращу достовірність передачі інформації. Враховуючи умови проведення магістерського дослідження, виконання аналізу представлених вище залежностей (рис. 2.7) відбуватиметься з точки зору розширення частотного ресурсу каналу зв'язку. Це у свою чергу означає, що енергетичний ресурс, а саме його показник h^2 буде знижуватися. Тоді, при заданих умовах процес зміни кратності модуляції у меншу сторону має ще більш суттєвий вплив на достовірність передачі інформації. Наприклад, виконується передача інформації по каналу зв'язку енергетичний показник якого $h^2 = 18,79$ дБ та використовується модуляція типу КАМ-64. У результаті забезпечується необхідна якість передачі інформації, тобто достовірність становить $p_6 = 9,57 \cdot 10^{-7}$. Нехай, відбудеться процес збільшення каналної швидкості передачі, наслідком якого буде показник відношення сигнал/шум на рівні $h^2 = 15$ дБ. В такому випадку модуляція КАМ-64 зможе забезпечити

передачу інформації з достовірністю $p_6 = 7,7 \cdot 10^{-4}$, яка не відповідає поставленим вимогам щодо підтримання ймовірності помилки на рівні $P_6 = 10^{-6}$. Але зниження кратності модуляції та використання модуляції типу КАМ-16 вирішує проблему незадовільної достовірності передачі. При відношенні сигнал/шум $h^2 = 15$ дБ модуляція типу КАМ-16 забезпечує передачу інформації з бітовою ймовірністю помилки на виході каналу зв'язку яка становить $p_6 = 1,82 \cdot 10^{-7}$ і задовольняє поставлені вимоги щодо якості передачі інформації. Іншими словами, модуляція вищої кратності має більшу кількість сигнальних точок ансамбля сигналів відповідної багатопозиційної модуляції, де кожна точка надається у вигляді амплітуди та фази гармонічного коливання, і це передбачає собою ускладнення розрізнення цих точок на приймальній стороні через зменшення відстані між цими точками. Тобто, результатом використання модуляції підвищеної кратності є збільшення швидкості передачі, оскільки збільшується кількість одиниць, що передаються в одному символі, при одночасному зменшенні показника завадостійкості системи передачі, а саме достовірності передачі яка виражена ймовірністю помилки, що погіршується.

Ретельний підхід до вибору типу модуляції для використання у системі зв'язку обумовлений саме властивістю модуляції забезпечувати передачу інформації без використання кодування на певному енергетичному діапазоні. Але водночас модуляції вищої кратності забезпечує більшу кількість переданої інформації. Саме тому потрібно раціонально обирати тип модуляції, щоб система передачі функціонувала ефективно.

Найчастіше, раціональний вибір модуляції який передбачає ефективне функціонування системи передачі, означає можливість системи зв'язку здійснювати передачу задовільної кількості інформації з певною достовірністю (незадовільною). Однак, вимоги щодо задоволення заданого рівня достовірності передачі інформації вимагають звернутися до іншого інструмента забезпечення достовірності – надлишкових завадостійких кодів, які володіють коригуючими властивостями.

Потрібно проаналізувати вплив кратності модуляції, що використовується, на стартовий параметр визначення параметрів кодування – виправну здатність коду. У якості інструменту для визначення цього стартового параметру використаємо біноміальну модель генерації помилок у бінарному каналі зв'язку [35, с. 62-63]:

$$P \geq \sum_{j=t+1}^n C_n^j \cdot p_6^j \cdot (1 - p_6)^{n-j}, \quad (2.8)$$

Ця модель дозволяє визначити виправну здатність коду t , яка може забезпечити задану достовірність $P_6 = 10^{-6}$ (бітова ймовірність помилки на виході декодера) використовуючи початкову бітову ймовірність помилки на виході каналу зв'язку, яка характеризується типом модуляції, що використовується.

Виконаємо графічну побудову залежності параметру виправної здатності коду t від відношення початкової ймовірності помилки до встановленої вимогами щодо достовірності передачі (кількість разів $k = \frac{p_6}{P}$). Для прикладу візьмемо код довжиною блоку $n = 500$ при двох різних енергетичних показниках каналу зв'язку $h^2 = 8$ та 12 дБ.

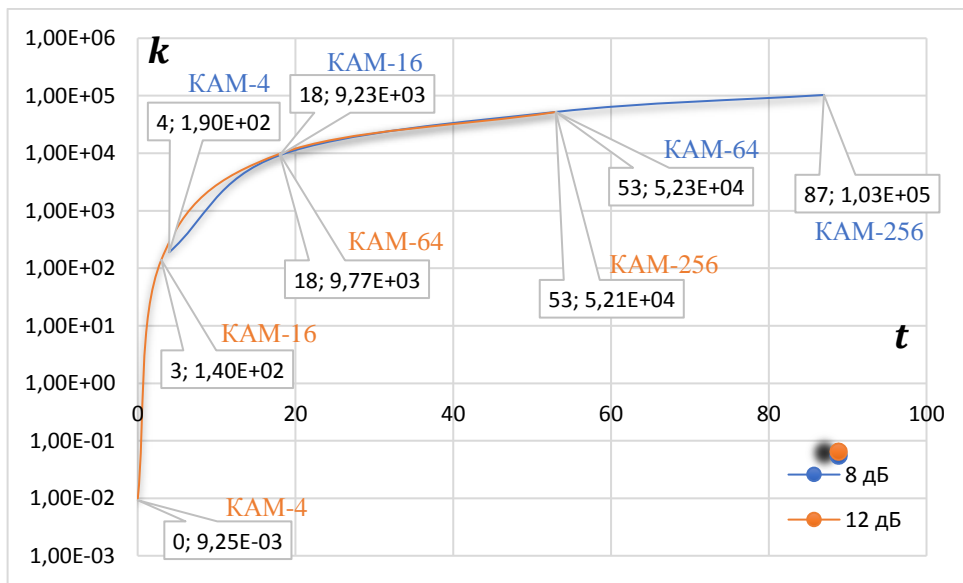


Рисунок 2.8 – Вплив модуляції на параметр виправної здатності коду

Розглянувши рисунок 2.8, можна побачити, що при використанні додаткового частотного ресурсу яке викликає зниження енергетичного ресурсу, погіршується ймовірність помилки, а це у свою чергу, означає зростання відношення початкової ймовірності помилки до встановленої вимогами (k) (рис. 2.8). Також рисунок 2.8 показує, що зниження енергетичного ресурсу при використанні будь-якого типу модуляції вимагає збільшення виправної здатності коду. Коли енергетика каналу зв'язку становить $h^2 = 12$ дБ, відношення початкової ймовірності помилки до заданої має від'ємний характер для модуляції типу КАМ-4, що означає наявну можливість передачі інформації без використання кодування при задоволенні вимог щодо достовірності.

Згідно формули 2.7 можна проаналізувати вплив модуляції на продуктивність. Для аналізу побудуємо графіки, які відповідають аналітичній залежності представленої формулою 2.7 [5, 35] при $\alpha = 250$ [$\mu\text{с}^{-1}$]:

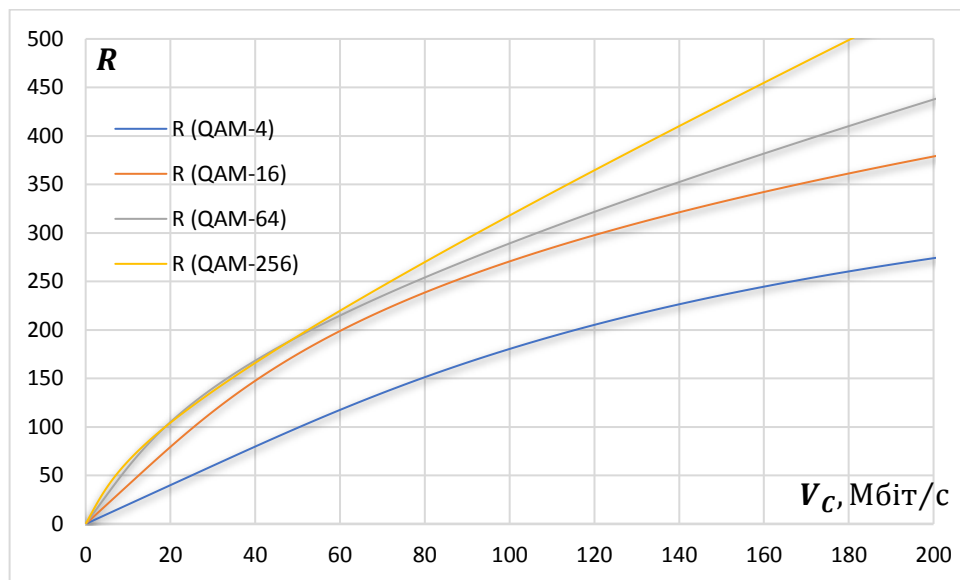


Рисунок 2.9 – Вплив модуляції на результуючу продуктивність системи передачі

На рисунку 2.9, можна побачити, що збільшення кратності модуляції збільшує продуктивність джерела повідомлень, але є деякий діапазон частот (канальної швидкості передачі), коли модуляція вищої кратності не має великої переваги перед модуляцією нижчої кратності. При цьому достовірність передачі при використанні різних типів модуляції відрізняється суттєво.

2.2.2 Аналіз впливу параметрів блокових кодів на параметри системи зв'язку

Аналіз проведений у попередньому пункті продемонстрував зв'язок між типом модуляції, що використовується, та початковим параметром завадостійких кодів – виправною здатністю коду. Наразі потрібно провести аналіз впливу усіх параметрів надлишкових кодів на задану вимогами достовірність передачі інформації та результуючу продуктивність джерела повідомлень. Проведення цього аналізу потребує використання таких інструментів:

- взаємозв'язок виправної здатності з відстанню по Хеммінгу:

$$d \geq 2t + 1, \quad (2.9)$$

- методику аналізу завадостійких можливостей блокових кодів:

$$r_c = \frac{k}{n} = \frac{n - 2d + 2 + \log_2(d)}{n}, \quad (2.10)$$

Формула 2.10 описує рівняння, що має назву границя Плоткіна. За допомогою нього можна знайти параметри найкращих за можливостями кодів, оскільки вона визначає максимальну інформаційну ефективність [30, 33].

$$r_c \leq \frac{k}{n} \leq 1 - \frac{\log_2 \sum_{i=0}^{d-2} C_{n-1}^i}{n}, \quad (2.11)$$

У свою чергу, формула 2.11 описує рівняння яке має назву границя Варшамова-Гільберта. За допомогою нього можна визначити параметри реально існуючих кодів (наприклад, БЧХ). Іншими словами, визначення параметрів коду за цією границею передбачає наявність реально існуючого коду з відповідними параметрами. Тобто ця границя гарантує існування коду [30, 33].

Оскільки, дослідження проводиться при умові додаткових частотних ресурсів які погіршують енергетику каналу зв'язку, то побудуємо спочатку залежність виправної здатності коду від енергетичного ресурсу (2.8), а саме від бітової ймовірності помилки (рис. 2.2, рис. 2.3) на виході каналу зв'язку (для прикладу виберемо довжину блоку коду $n = 250, 500, 750, 1000$):

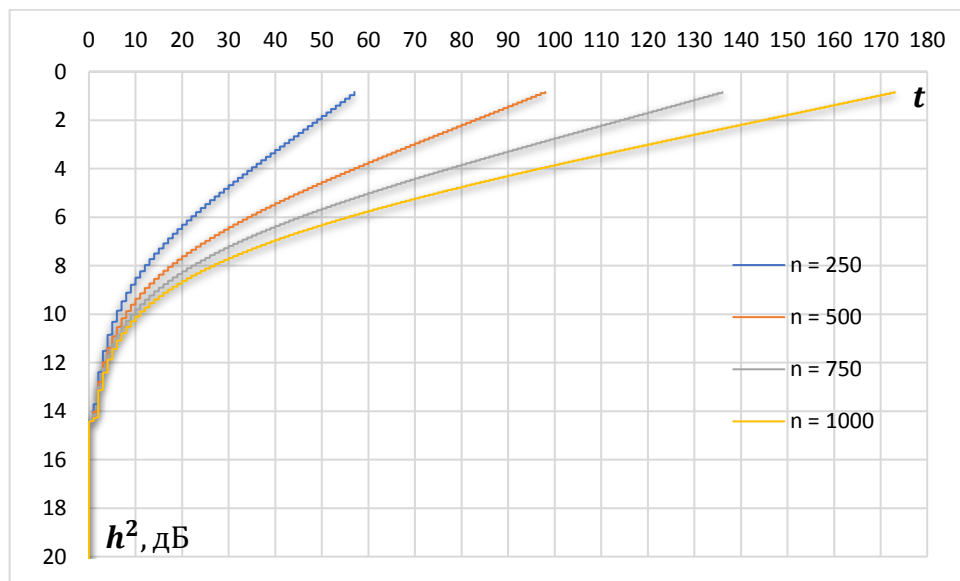


Рисунок 2.10 – Залежність параметру виправної здатності коду від енергетичного ресурсу

Аналізуючи залежності (рис. 2.10), одразу можна сказати, що кодування яке має більший параметр довжини блоку коду, водночас повинно мати більшу виправну здатність коду. Наприклад, при однаковій енергетиці

каналу зв'язку ($h^2 = 6$ дБ) та використання кодів з довжиною блоку $n = 250, 500, 750, 1000$, їх виправна здатність повинна бути $t = 22, 34, 45, 46$ для забезпечення бітової ймовірності помилки на виході декодера на рівні $P_6 = 10^{-6}$. При менш жорстких умовах до достовірності виправна здатність коду може бути меншою. Іншими словами, маючи вимогу щодо достовірності передачі та обравши певну довжину блоку коду, завжди можна визначити яку виправну здатність повинен мати код для задоволення цієї умови.

Однак, потрібно пам'ятати про методику аналізу завадостійких можливостей, оскільки тільки вона може підтвердити існування коду та показати його найкращі можливості. Наприклад, якщо енергетика каналу зв'язку знаходиться на рівні $h^2 = 3$ дБ та вибрано параметр довжини блоку коду $n = 15$, то для забезпечення заданої достовірності передачі виправна здатність цього коду повинна бути $t = 5$. Проаналізувавши код з визначеними параметрами за допомогою методики аналізу завадостійких можливостей блокових кодів, а саме, використавши границю Плоткіна та границю Варшамова-Гільберта, можна побачити, що даного коду не існує. Тобто, не може існувати коду довжиною блоку $n = 15$ який може забезпечити задану достовірність передачі інформації ($P_6 = 10^{-6}$) при наявній енергетиці каналу зв'язку ($h^2 = 3$ дБ).

Тепер потрібно проаналізувати інструменти методики завадостійких можливостей блокових кодів, а саме, границю Плоткіна та границю Варшамова-Гільберта. Для цього використовуючи 2.8 та 2.9 побудуємо залежність виправної здатності коду від нормованої (поділеної на $2n$) відстані по Хеммінгу.

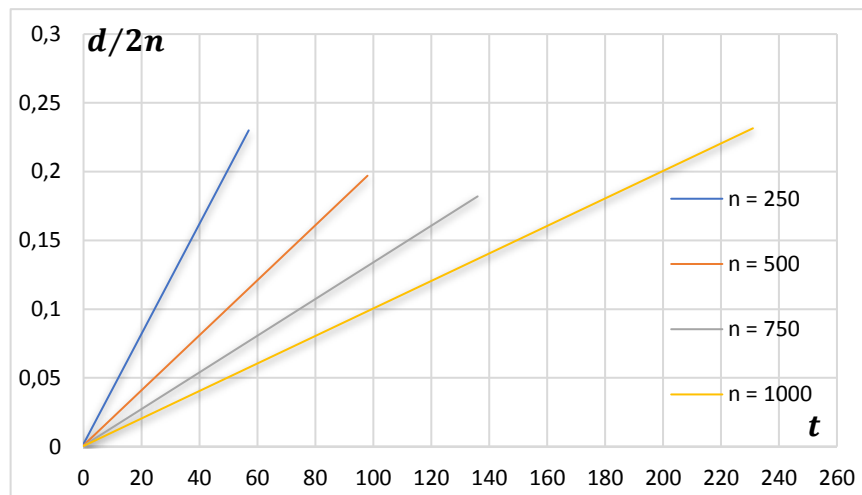


Рисунок 2.11 – Залежність нормованої відстані по Хеммінгу від виправної здатності коду

Аналіз графічної залежності (рис. 2.11) показує зростання відстані по Хеммінгу при зменшенні довжини блоку коду, що використовується, або при збільшенні виправної здатності коду. Щоб визначити характер цих змін потрібно побудувати залежність швидкості кодування за цими двома границями (2.10 та 2.11) від відстані по Хеммінгу. Для побудови використаємо два полотна. На першому (рис. 2.12) буде границя Плоткіна та границя Варшамова-Гільберта побудована для кодів з довжиною блоку $n = 200$, оскільки дані границі мають властивість змінюватись в залежності від параметру довжини блоку коду. На другому (рис. 2.13) будуть відображена лише границя Плоткіна для кодів з довжинами блоку коду $n = 250, 500, 750, 1000$, оскільки у цьому дослідженні робиться уклін на максимальні можливості системи передачі.

На рисунку 2.12 видно, що ріст нормованої відстані по Хеммінгу відповідає спаду швидкості кодування. Інакше кажучи, кодування починає більше ресурсів відбирати та витратити для здійснення передачі не корисної інформації.

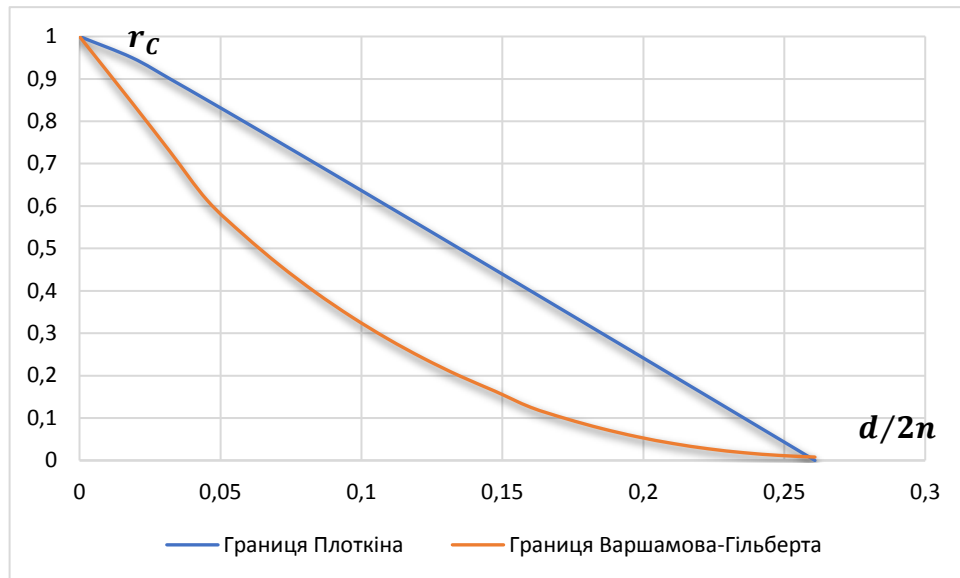


Рисунок 2.12 – Залежність швидкості коду від нормованої відстані по Хеммінгу ($n = 200$)

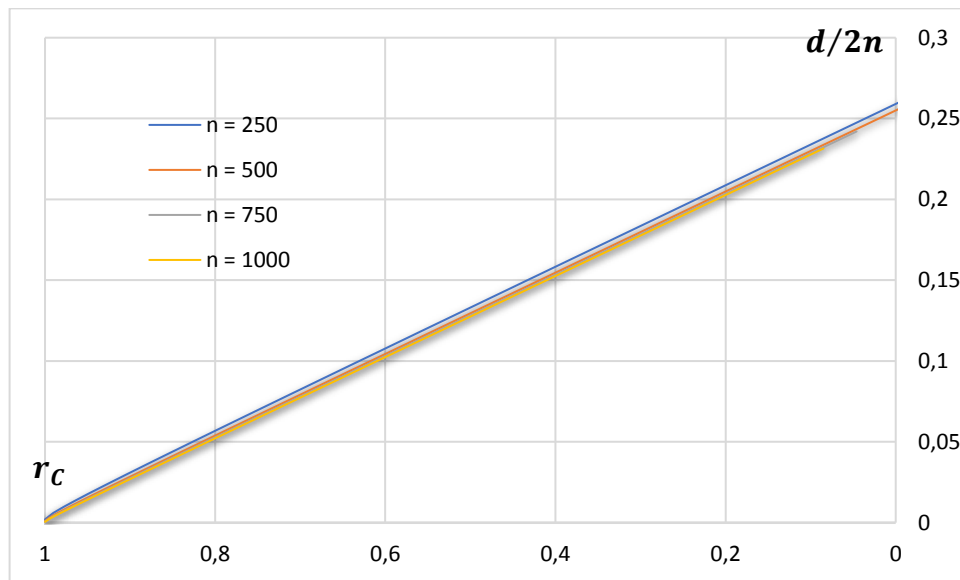


Рисунок 2.13 – Залежність швидкості коду від нормованої відстані по Хеммінгу ($n = 250, 500, 750, 1000$)

Розгляд залежності (рис. 2.13) показує властивість границі Плоткіна наближуватися до $d/2n = 0,25$ при збільшенні параметру довжини блоку коду. Звісно, характер зміни швидкості кодування від нормованого значення відстані по Хеммінгу співпадає з попередньою залежністю (рис. 2.12). Варто відмітити, що при однаковій нормованій відстані по Хеммінгу, код з меншою

довжиною блоку коду має більшу швидкість кодування, а це у свою чергу, означає, що він менше ресурсів відбирає на передачу не корисної інформації.

Для оцінки кількості витраченого ресурсу на передачу не корисної інформації потрібно трошки модернізувати формулу 2.7 для отримання формули визначення продуктивності джерела повідомлень з використанням завадостійкого кодування [7]:

$$R = V_c \cdot \log_2 M \cdot r_c \cdot (1 + p_{\text{біт}} \log_2 p_{\text{біт}} + (1 - p_{\text{біт}}) \log_2 (1 - p_{\text{біт}})), \quad (2.12)$$

де: $r_c = \frac{k}{n}$ – швидкість коду, яка дорівнює відношенню інформаційних символів джерела повідомлення к довжині блоку коду.

Використаємо формулу 2.12 та побудуємо залежність продуктивності джерела повідомлень з кодуванням. При цьому використовуються коди, що мають найкращу інформаційну ефективність – визначені за границею Плоткіна.

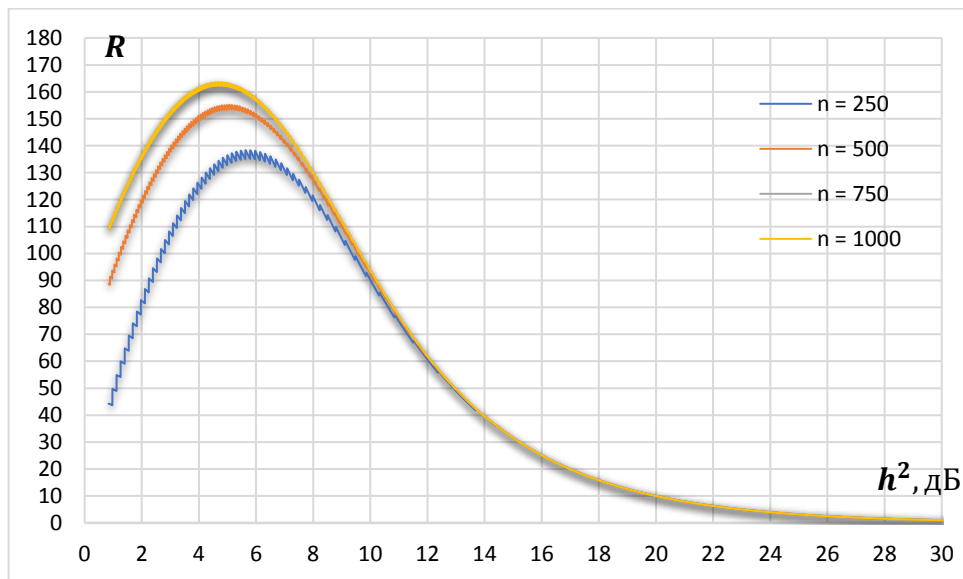


Рисунок 2.14 – Вплив параметрів обраного кодування на продуктивність джерела повідомлень

Звернувши увагу на залежність (рис. 2.14), можна побачити, що при енергетичному показнику каналу зв'язку $h^2 = 14,44$ дБ та вище будь-які з

представлених кодів мають однаковий вплив на продуктивність. Це відбувається саме через гарний енергетичний показник за якого модуляція КАМ-16 може здійснювати передачу інформації, задовольняючи вимоги щодо достовірності, не застосовуючи завадостійке кодування.

Коли можливостей модуляції не вистачає за справу беруться надлишкові коди. Можна помітити, що використання коду з вищою довжиною блоку коду призводить до підвищення продуктивності джерела повідомлень. Але, навіть, вони не можуть забезпечити постійне зростання продуктивності джерела, тобто мають межу своїх можливостей. У певний момент виникає ситуація, коли характер зменшення швидкості кодування (рис. 2.13) переважає над характером зростання каналної швидкості передачі (рис. 2.1), і продуктивність джерела повідомлень починає знижуватись.

Головною метою для обрання параметрів системи передачі є поєднання двох етапів: раціонального вибору модуляції для інформаційної ефективності передачі інформації та визначення параметрів надлишкового коду для забезпечення заданої достовірності передачі.

Варто завжди обирати для використання код з найбільшою з можливих довжиною блоку коду та намагатись досягти найвищої швидкості кодування. В такому випадку буде витратиться мінімальна частина ресурсів для передачі не корисної інформації. Такого підходу варто дотримуватись, навіть, за умов використання додаткових ресурсів каналу зв'язку.

Висновки з розділу 2

1. Взаємозв'язок частотного ресурсу з енергетичним є обернено-пропорційним через інтегральний показник просторово-енергетичних параметрів системи передачі, що виражений у відношенні сигнал/шум h^2 . Тому вплив цих ресурсів на продуктивність джерела повідомлень є аналогічним, а саме, збільшення частотного ресурсу призводить до

збільшення продуктивності джерела (зменшення достовірності передачі), а збільшення енергетичного ресурсу до зменшення продуктивності джерела (збільшення достовірності передачі).

2. Зниження енергетичного ресурсу при розширенні частотного ресурсу дозволяє модуляції нижчої кратності краще забезпечувати вимоги щодо достовірності. Інформаційна ефективність системи передачі залежить саме від вибору типу модуляції, оскільки гарна енергетика каналу зв'язку дозволяє модуляції нижчої кратності передавати інформації без використання коду, але з низьким показником кількості переданої інформації, а модуляція вищої кратності дозволяє передавати задовільну кількість інформації але при незадовільній достовірності передачі.

3. Тип модуляції характеризує початкова бітова ймовірність помилки на виході каналу зв'язку. Більша різниця між початковою бітовою ймовірністю помилки та встановленою вимогами щодо достовірності передачі означає більшу виправну здатність якою повинен володіти код.

4. Першим параметром завадостійкого кодування визначається довжина блоку коду. При збільшенні довжини блоку коду збільшується його виправна здатність та швидкість, що означає збільшення продуктивності джерела повідомлень. Але варто пам'ятати, що ймовірність потрапляння більшої кількості помилок у такий блок збільшується.

3 АНАЛІЗ ПРОВЕДЕНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАНОЇ ДОСТОВІРНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ В УМОВАХ СТАЛОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ ДЖЕРЕЛА ПОВІДОМЛЕНЬ

3.1 Можливості блокового кодування при розширенні спектральних характеристик джерела повідомлень

З кожним днем вимоги споживачів у споживанні великої кількості інформації тільки зростає [4, 39]. Саме тому усі телекомунікаційні системи, в першу чергу, тримають напрямок розвитку у збільшення швидкості передачі інформації. При цьому забезпечення необхідної достовірності передачі інформації цілком залежить от спеціаліста, який налаштовує мережу та враховує, що при збільшенні інформаційної швидкості потрібно залучати додаткові ресурси каналу зв'язку: спектральні, енергетичні, часові [11, 14]. Але ресурси не є безкоштовними. Тому від способу залучення додаткових ресурсів залежить рентабельність інформаційної системи в цілому [10, 12].

В даному дослідженні, не потрібно жертвувати деяким частотним ресурсом, щоб забезпечити відповідну достовірність. Було вирішено заздалегідь, що буде виконана процедура розширення частотного ресурсу, таким чином, щоб при цьому зберегти фіксованою швидкість джерела повідомлень при заданій достовірності [4,13].

Головним інструментом буде універсальний алгоритм управління ситуацією у каналі зв'язку [14, 24, 25, 43].

У цьому пункті проведемо аналіз можливостей блокового кодування коли розширюється спектральна характеристика каналу зв'язку – канална швидкість передачі. Вимогами при цьому є:

- достовірність передачі повинна бути на рівні $p_{\text{біт}} = 10^{-6}$;
- фіксована швидкість джерела повідомлень V_S .

Розглянемо надлишковий завадостійкий код за допомогою якого забезпечується необхідна достовірність передачі інформації в умовах

фіксованої швидкості джерела повідомлень яка відображує граничні можливості знайденого коду при певній енергетиці каналу зв'язку.

Нехай є система передачі даних початкові параметри якої наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Початкові параметри системи передачі даних (1 випадок)

α , МГц	<i>Mod.</i>	V_S , Мбіт/с	h^2 , дБ	p_{bit}	V_C , Мбіт/с
600	ФМ – 2	75	9,03	$3,17 \cdot 10^{-5}$	75

Можна побачити, що ймовірність помилки не задовольняє вимоги, які ставимо для дослідження, а саме ймовірність бітової помилки повинна бути на рівні 10^{-6} . Потрібно забезпечити достовірність вимогам, тому використаємо кодування [7], після чого перевіримо чи вистачить можливостей обраного коду для забезпечення заданої достовірності при розширенні спектру за умови фіксації швидкості джерела повідомлень [3, 28]. При цьому основним інструментом є частотний ресурс, який будемо збільшувати.

Головним параметром кодування, який обираємо є довжина блоку коду. Нехай код буде довжиною $n = 500$. Використовуючи відпрацьовану методику визначимо параметри системи передачі з використанням кодування та занесемо до таблиці 3.2 [1, 14].

Таблиця 3.2 – Параметри системи передачі даних з кодуванням (1 випадок)

V_C , Мбіт/с	h^2 , дБ	p_{bit} До кодування	t	p_{bit} Після кодування	r_c	V_S , Мбіт/с
75	9,03	$3,17 \cdot 10^{-5}$	2	$6,5 \cdot 10^{-7}$	0,989	74,1

Тепер використовуючи вже знайдений код виконаємо операцію розширення спектру, а саме збільшення швидкості передачі даних. При цьому варто потрібно проаналізувати, чи вистачає можливостей (знайдених параметрів) кодування щоб забезпечити достовірність при даній енергетиці каналу зв'язку.

Щоб знайти до якої швидкості передачі даних використаємо таку формулу [5, 28]:

$$V_S = V_C \cdot \log_2(M) \cdot r_c, \quad (3.1)$$

де: V_S – швидкість джерела повідомлень;

V_C – канална швидкість передачі (частотний ресурс);

M – кратність модуляції;

r_c – швидкість кодування.

$$V_{S_1} = V_{C_2} \cdot 1 \cdot r_{c_2} = V_{C_2} \cdot 0,99$$

За початковими параметрами системи передачі $V_{S_1} = 75$. Тоді:

$$V_{C_2} = \frac{V_{S_1}}{r_{c_2}} = \frac{75}{0,989} = 75,86 \text{ Мбіт/с}$$

Збільшимо швидкість передачі символів у каналі зв'язку та проведемо розрахунок всіх інших параметрів системи передачі інформації, котрі занесемо до таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Параметри після розширення спектру (1 випадок)

V_S , Мбіт/с	V_C , Мбіт/с	h^2 , дБ	p_{bit} До кодування	t	p_{bit} Після кодування	r_c
75	75,86	8,98	$3,49 \cdot 10^{-5}$	2	$8,66 \cdot 10^{-7}$	0,989

Відобразимо рішення відповідної задачі графічно на рисунку 3.1.

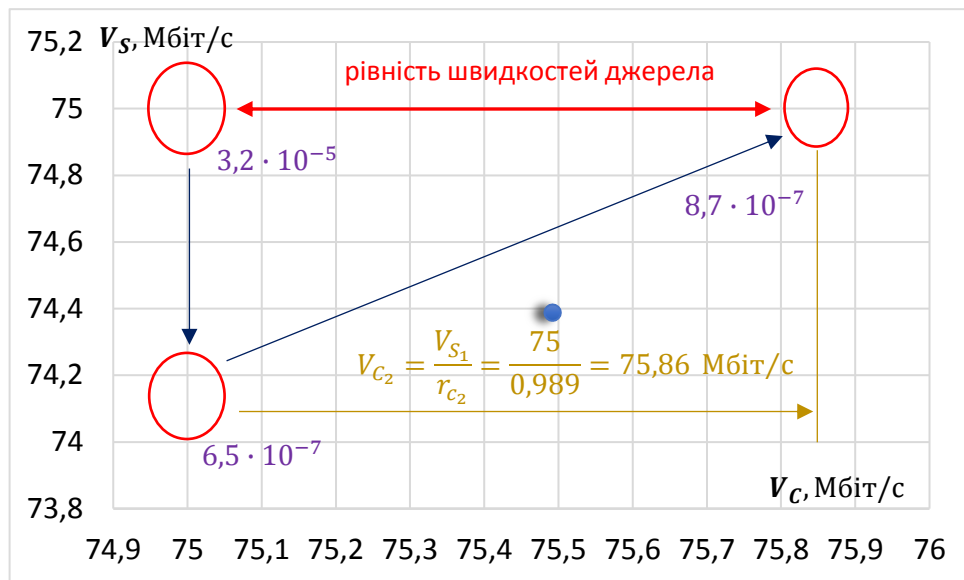


Рисунок 3.1 – Графічне відображення 1 випадку

Як можна побачити, можливостей надлишкового коду вистачило, щоб при розширенні спектру домогтись заданих вимог до достовірності передачі та умови сталості швидкості передачі у каналі зв'язку.

Тепер потрібно перевірити алгоритм при іншій енергетиці каналу зв'язку. Під середнім показником енергетики вважатимемо відношення сигнал/шум $h^2 = 7$ дБ та $h^2 = 5$ дБ, звісно по відношенню до модуляції, що використовується – ФМ-2.

Збільшимо показник, що фіксуємо, а саме швидкість джерела повідомлень до показника 120 Мбіт/с та виконаємо перерахунок.

Початкові параметри системи передачі інформації у цьому випадку будуть такими:

Таблиця 3.4 – Початкові параметри системи передачі даних (2 випадок)

α , МГц	Mod.	V_S , Мбіт/с	h^2 , дБ	p_{bit}	V_C , Мбіт/с
600	ФМ – 2	120	6,99	$7,83 \cdot 10^{-4}$	120

Збільшення фіксованої швидкості джерела повідомлень, погіршило енергетику у каналі зв'язку до 6,99 дБ. Звісно, одразу за енергетикою

погіршилася якість передачі. Тобто, в цьому випадку можна казати про недостовірність передачі інформації більш впевненіше, оскільки ймовірність помилки знаходиться вже на рівні 10^{-4} .

Як і в минулому експерименті, використаємо кодування ($n = 500$) для забезпечення достовірності передачі та занесемо усі параметри системи з кодуванням до таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Параметри системи передачі даних з кодуванням (2 випадок)

V_C , Мбіт/с	h^2 , дБ	p_{bit} До кодування	t	p_{bit} Після кодування	r_c	V_S , Мбіт/с
120	6,99	$7,83 \cdot 10^{-4}$	6	$1,9 \cdot 10^{-7}$	0,959	115,13

Таблиця 3.5 показує як змінюються параметри системи передачі інформації при погіршенні початкових параметрів. А саме:

- погіршення початкової ймовірності помилки призводить до підвищення виправної здатності коду (з 2 до 6);
- збільшення виправної здатності коду впливає на його швидкість – вона зменшується. Це означає, що на кодування віддається більше ресурсів.

Використовуючи формулу 3.1, знову визначимо на яку кількість збільшувати каналну швидкість передачі, щоб значення швидкості джерела повідомлень залишилося незмінним.

$$V_{S_1} = V_{C_2} \cdot 1 \cdot r_{c_2} = V_{C_2} \cdot 0,99$$

За початковими параметрами системи передачі $V_{S_1} = 120$. Тоді:

$$V_{C_2} = \frac{V_{S_1}}{r_{c_2}} = \frac{120}{0,959} = 125,08 \text{ Мбіт/с}$$

Саме до такого значення потрібно розширити наш спектр. Аналогічно минулому пункту визначаємо параметри системи після процедури розширення та заносимо їх до таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Параметри після розширення спектру (2 випадок)

V_S , Мбіт/с	V_C , Мбіт/с	h^2 , дБ	p_{bit} До кодування	t	p_{bit} Після кодування	r_c
120	125,08	6,81	$9,76 \cdot 10^{-4}$	6	$8,24 \cdot 10^{-7}$	0,959

Відобразимо рішення відповідної задачі графічно на рисунку 3.2.

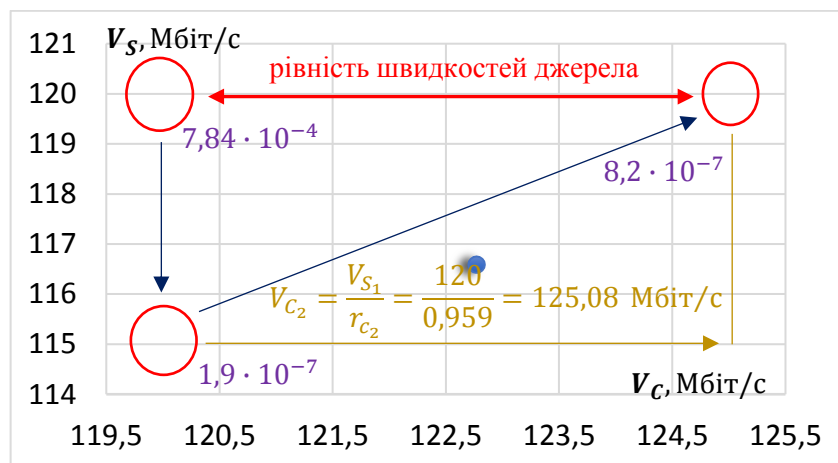


Рисунок 3.2 – Графічне відображення 2 випадку

Результат другого випадку показує, що навіть при погіршенні початкових параметрів системи, дана процедура з фіксуванням швидкості джерела повідомлень при забезпеченні заданої достовірності справляється після двох кроків одразу. Саме тому експеримент проводиться у напрямку пониження енергетики каналу зв'язку.

Перейдемо до третього випадку, де збільшимо швидкість джерела повідомлень до 190 Мбіт/с та зафіксуємо.

Таблиця 3.7 – Початкові параметри системи передачі даних (3 випадок)

α , МГц	<i>Mod.</i>	V_S , Мбіт/с	h^2 , дБ	p_{bit}	V_C , Мбіт/с
600	ФМ – 2	190	4,99	$5,98 \cdot 10^{-3}$	190

В цьому випадку енергетика каналу досягає рівня 4,99 дБ. В цілому, початковий стан системи гірший ніж у другому випадку. Одразу знайдемо параметри кодування, що забезпечать достовірність та занесемо їх до таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Параметри системи передачі даних з кодуванням (3 випадок)

V_C , Мбіт/с	h^2 , дБ	p_{bit} До кодування	t	p_{bit} Після кодування	r_c	V_S , Мбіт/с
190	4,99	$5,98 \cdot 10^{-3}$	14	$5,65 \cdot 10^{-7}$	0,898	170,6

Таблиця 3.8 показує сталу динаміку, де виправна здатність збільшується, а швидкість коду зменшується. Використаємо формулу 3.1, та знайдемо на яку кількість потрібно розширити наш спектр. Дані з підрахунками занесемо до таблиці 3.9.

$$V_{C_2} = \frac{V_{S_1}}{r_{c_1}} = \frac{190}{0,898} = 211,65 \text{ Мбіт/с}$$

Таблиця 3.9 – Параметри після розширення спектру (3 випадок)

V_S , Мбіт/с	V_C , Мбіт/с	h^2 , дБ	p_{bit} До кодування	t	p_{bit} Після кодування	r_c
190	211,65	4,53	$8,63 \cdot 10^{-3}$	14	$4,17 \cdot 10^{-5}$	0,898

Тепер, розпочинається саме цікаве. Проаналізувавши таблицю 2.9, можливо помітити два головних чинника:

- аналогічно до минулих випадків забезпечена сталість швидкості джерела повідомлень;
- в цьому випадку при розширенні спектру з використанням вже відомого коду не забезпечується задана достовірність передачі, оскільки показник ймовірності бітової помилки в даному випадку знаходиться на рівні 10^{-5} .

Прийшовши до такої ситуації потрібно зробити такі кроки:

- 1) коли знайдений код не забезпечив достовірність, потрібно визначити параметри нового кодування для стану системи після розширення (по аналогії до початкового стану);
- 2) виконати повторне розширення спектру з використанням нового коду.

Тобто, потрібно виконати всі дії, які виконувалися до цього, але вже вважаючи що стан системи після розширення є в деякому сенсі початковим. В першу чергу знайдемо параметри кодування, що забезпечить достовірність та занесемо до таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Параметри системи передачі даних з кодуванням (3 випадок – повторний розрахунок)

V_C , Мбіт/с	h^2 , дБ	p_{bit} До кодування	t	p_{bit} Після кодування	r_c	V_S , Мбіт/с
211,65	4,53	$8,63 \cdot 10^{-3}$	17	$6,04 \cdot 10^{-7}$	0,874	185

Тепер використовуючи нову швидкість коду знаходимо каналну швидкість передачі до якої потрібно розширити.

$$V_{C_3} = \frac{V_{S_1}}{r_{C_2}} = \frac{190}{0,874} = 217,33 \text{ Мбіт/с}$$

Розширимо частотну полосу до цього рівня та використовуючи другий знайдений код визначимо інші параметри системи та занесемо їх до таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Параметри після розширення спектру (3 випадок – повторний розрахунок)

V_S , Мбіт/с	V_C , Мбіт/с	h^2 , дБ	p_{bit} До кодування	t	p_{bit} Після кодування	r_c
190	217,33	4,41	$9,39 \cdot 10^{-3}$	17	$1,96 \cdot 10^{-6}$	0,874

Можна помітити, що після повторних дій значення ймовірності помилки наблизилося до заданих вимог, але все ж таки вище. У зв'язку з цим, потрібно провести ще один перерахунок і впевнитись, що результат задовольнить обидві вимоги: сталість швидкості джерела та забезпечення достовірності на рівні 10^{-6} .

Знаходимо параметри нового коду та заносимо відповідно до таблиці 3.12.

Таблиця 3.12 – Параметри системи передачі даних з кодуванням (3 випадок – 2-ий повторний розрахунок)

V_C , Мбіт/с	h^2 , дБ	p_{bit} До кодування	t	p_{bit} Після кодування	r_c	V_S , Мбіт/с
217,33	4,41	$9,39 \cdot 10^{-3}$	18	$4,64 \cdot 10^{-7}$	0,866	188,3

Знову, використовуючи нову швидкість коду знаходимо каналну швидкість передачі до якої потрібно розширити.

$$V_{C_4} = \frac{V_{S_1}}{r_{c_3}} = \frac{190}{0,866} = 219,29 \text{ Мбіт/с}$$

Збільшимо каналну швидкість передачі до цього значення та визначимо усі параметри системи передачі. Дані занесемо до таблиці 3.13.

Таблиця 3.13 – Параметри після розширення спектру (3 випадок – 2-ий повторний розрахунок)

V_S , Мбіт/с	V_C , Мбіт/с	h^2 , дБ	p_{bit} До кодування	t	p_{bit} Після кодування	r_c
190	219,29	4,37	$9,66 \cdot 10^{-3}$	18	$7,03 \cdot 10^{-7}$	0,866

Для більшої наочності дослідження зобразимо цей випадок графічно на рисунку 3.3:

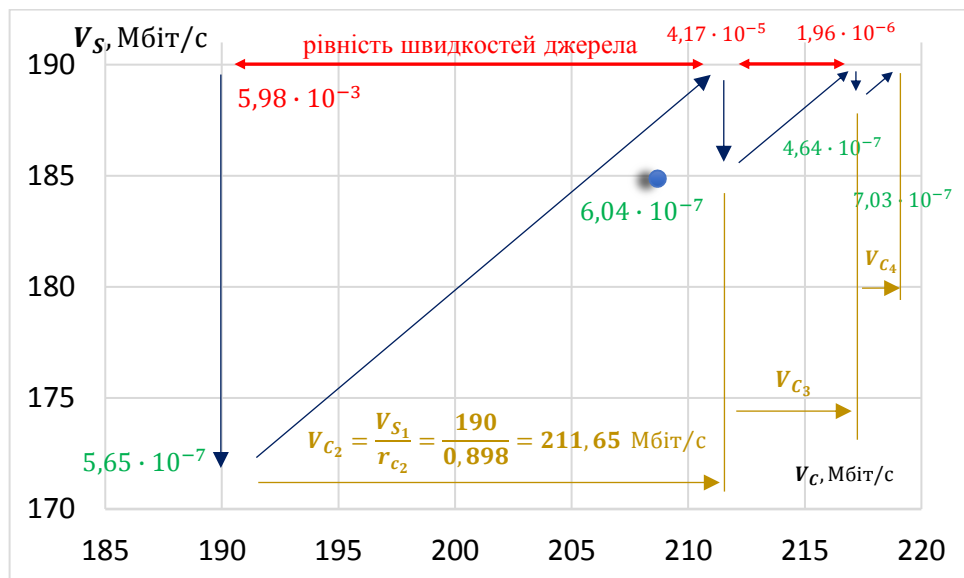


Рисунок 3.3 – Графічне відображення 3 випадку

За рисунком 3.3, можна зробити висновок, що для знаходження завадостійкого коду який забезпечить умову незмінності швидкості джерела повідомлень та забезпечить достовірність з використанням додаткового частотного ресурсу потрібно було провести дії, які були представлені у випадках 1-2, але вже декілька разів.

Інакше кажучи, чим менший початковий енергетичний запас системи передачі, тим більшу кількість циклічних дій зі знаходження параметру коду та збільшення частотного ресурсу потрібно буде відтворити. Перевіримо дане твердження і надалі.

Проведемо аналогічний аналіз, але вже при низькій енергетиці. Під низькою енергетикою будемо розуміти рівень відношення сигнал/шум $h^2 = 3$ дБ.

У минулому пункті було наголошено, що при низькій енергетиці кількість циклічних операцій скоріш за все буде зростати, тому не будемо детально описувати дії, оскільки вони вже були описані вище.

Представимо таблицю з підрахунками параметрів усіх станів системи передачі, на кшталт наведений вище. І у кінці, приведемо графічне відображення вирішення поставленої задачі.

В цьому випадку буде лише одна таблиця з даними, які отримані після циклічних дій описаних вище. Головною ціллю при цьому експерименті є підрахунок кількості циклічних операцій, якщо це можливо. Оскільки можливий такий випадок, коли дану операцію можна робити до безкінечності і вона не буде приносити результату. При такій ситуації потрібно розробити рекомендації, щодо подальших дій.

Представимо даний випадок одразу графічно на рисунку 3.4, щоб краще проаналізувати.

Таблиця 3.14 описує кожний перехід між станами, коли виконується зміна параметрів системи передачі.

Таблиця 3.14 – Параметри після розширення спектру (4 випадок – узагальнена таблиця станів)

№ стану	V_s , Мбіт/с	h^2 , дБ	V_c , Мбіт/с	p_{bit} До кодування	t	p_{bit} Після кодування	r_c
1	300	3	300	$2,3 \cdot 10^{-2}$			
2	231,6	3	300,0	$2,3 \cdot 10^{-2}$	30	$7,9 \cdot 10^{-7}$	0,77
3	300	1,9	388,7	$3,9 \cdot 10^{-2}$	30	$9,9 \cdot 10^{-3}$	0,77
4	260	1,9	388,7	$3,9 \cdot 10^{-2}$	43	$9,3 \cdot 10^{-7}$	0,67
5	300	1,3	448,5	$5,1 \cdot 10^{-2}$	43	$3,7 \cdot 10^{-4}$	0,67
6	268	1,3	448,5	$5,1 \cdot 10^{-2}$	52	$5,6 \cdot 10^{-7}$	0,60
7	300	0,8	502,2	$6,1 \cdot 10^{-2}$	52	$8,2 \cdot 10^{-5}$	0,60
8	272,1	0,8	502,2	$6,1 \cdot 10^{-2}$	59	$6,2 \cdot 10^{-7}$	0,54
9	300	0,3	553,7	$7,0 \cdot 10^{-2}$	59	$4,7 \cdot 10^{-5}$	0,54
10	273,6	0,3	553,7	$7,0 \cdot 10^{-2}$	65	$8,6 \cdot 10^{-7}$	0,49
11	300	-0,1	607,2	$8,0 \cdot 10^{-2}$	65	$4,6 \cdot 10^{-5}$	0,49
12	266,2	-0,1	607,2	$8,0 \cdot 10^{-2}$	72	$5,1 \cdot 10^{-7}$	0,44
13	300	-0,6	684,4	$9,3 \cdot 10^{-2}$	72	$8,1 \cdot 10^{-5}$	0,44
14	256,4	-0,6	684,4	$9,3 \cdot 10^{-2}$	80	$6,7 \cdot 10^{-7}$	0,37
15	300	-1,3	800,7	$1,1 \cdot 10^{-1}$	80	$3,1 \cdot 10^{-4}$	0,37
16	229,8	-1,3	800,7	$1,1 \cdot 10^{-1}$	91	$7,9 \cdot 10^{-7}$	0,29
17	300	-2,4	1045,2	$1,4 \cdot 10^{-1}$	91	$5,4 \cdot 10^{-3}$	0,29
18	141,7	-2,4	1045,2	$1,4 \cdot 10^{-1}$	110	$9,7 \cdot 10^{-7}$	0,14
19	300	-5,7	2212,8	$2,3 \cdot 10^{-1}$	110	$6,9 \cdot 10^{-1}$	0,14

Можливо помітити залежність зміни достовірності передачі після кодування та швидкості джерела повідомлень. Спочатку незадовільна достовірність при розширенні і підтримка швидкості джерела повідомлень, а потім навпаки задовільна достовірність, але не фіксована швидкість джерела.

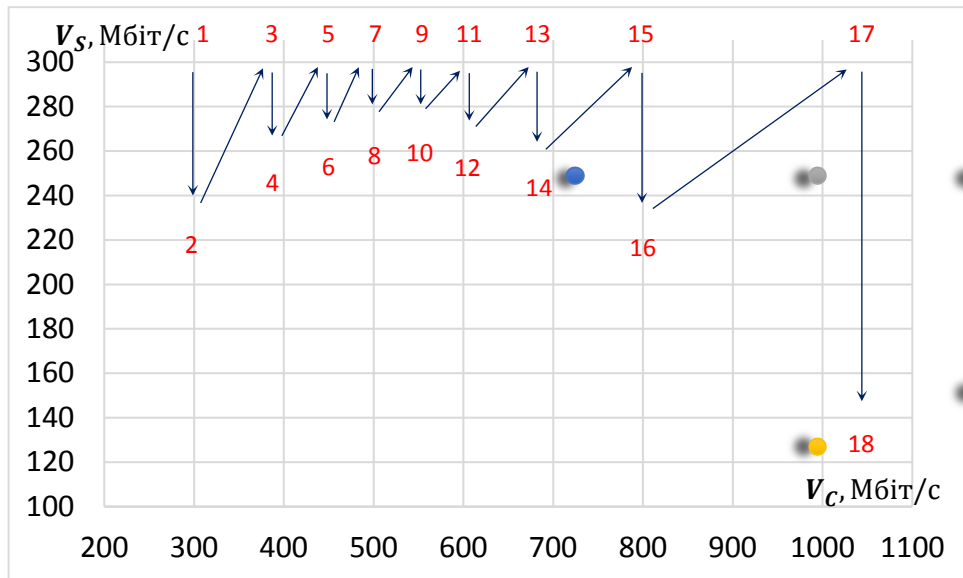


Рисунок 3.4 – Графічне відображення задачі

Можна побачити, що при низькій початковій енергетиці, даної методикою не вдалося вирішити поставлену задачу згідно заданих вимог.

При аналізі таблиці 3.14 та рисунку 3.4, можна побачити, що існує деяка границя після якої виконання циклічних кроків (описаних при дослідженні з середнім показником енергетики каналу зв'язку) ситуація тільки погіршується і досягти обох поставлених вимог неможливо.

Розглядаючи таблицю 3.14, варто відмітити 11 стан системи передачі, коли енергетика каналу зв'язку становиться дуже малою. При розширенні частотного ресурсу до показника 607,2 Мбіт/с, відношення сигнал/шум в кількості разів становить менше 1, а саме $h^2 = 0,988$ раз. Інакше кажучи, в цьому стані при знаходженні параметрів нового коду при переході до 12 стану, параметр швидкості джерела повідомлень починає динаміку погіршення.

Енергетичною границею у цьому дослідженні можна вважати відношення сигнал/шум, що дорівнює $h^2 = 0$ дБ або $h^2 = 1$ раз. Подальші циклічні кроки описані у цьому дослідженні не мають сенсу, коли енергетичний рівень становить $h^2 < 0$.

Дослідження показало, що використання даного алгоритму синтезу параметрів блокового коду не є доцільним при низькому початковому енергетичному параметру системи передачі, оскільки малого запасу може не вистачити щоб забезпечити поставлені вимоги до передачі, а подальше їх виконання вже починає знижувати продуктивність каналу зв'язку.

3.2 Аналіз алгоритму управління параметрами каналу зв'язку для забезпечення заданої достовірності за умови сталої продуктивності

У сучасності, телекомунікаційні системи розвиваються все швидше і швидше, щоб охопити якомога більше потреб споживачів, і надавати послуги якісно для задоволення цих потреб. У зв'язку з цим, створюються нові технології передачі даних, які обумовлюють створення нових систем передачі, або модифікації вже існуючих систем передачі з точки зору використання більших (максимальних) можливостей цих систем.

Через це, інженери телекомунікацій зіштовхуються з рядом проблем, які виникають при проектуванні нових систем, або модифікації вже існуючих систем передачі. Проблеми, що виникають можуть мати різний характер:

- топологічний: як правильно розташувати обладнання на місцевості і супутні нюанси;
- ресурсоємний: скільки ресурсів телекомунікаційної системи виділено та як ними правильно розпоряджатися;
- вимогливий: фіксовані потреби споживачів, які неодмінно потрібно задовольнити.

Дана класифікація є довільною та кількість проблем з якими зіштовхуються інженери телекомунікацій є набагато більшою.

Представлений алгоритм буде вирішувати проблему з забезпечення якісної передачі інформації з одночасною умовою незмінності продуктивності джерела повідомлень. В даному випадку алгоритм передбачає збільшення використання частотного ресурсу, оскільки частина

ресурсу буде відокремлюватися на достовірну передачу інформації, а саме на кодування.

Алгоритм управління ситуацією у каналі зв'язку для забезпечення заданої достовірності при незмінності продуктивності джерела повідомлень складається з п'яти етапів:

1) Визначення початкових параметрів системи передачі: енергетичного показника, типу модуляції, ймовірності бітової помилки на виході каналу зв'язку та продуктивності джерела повідомлень без кодування;

2) Обрання довжини блоку коду та визначення нової каналної швидкості передачі, яка може задовольнити вимогу сталої продуктивності джерела повідомлень, по заздалегідь сформованим апроксимаційним залежностям;

3) Визначити параметри системи передачі при використанні завадостійкого кодування: новий енергетичний показник, нову бітову ймовірність помилки на виході каналу зв'язку, виправну здатність коду, швидкість коду та продуктивність джерела повідомлень з кодуванням;

4) Підлаштування каналної швидкості передачі для забезпечення незмінної продуктивності джерела повідомлень (трохи додати чи відняти);

5) Повторне визначення параметрів кодування з метою підтвердження їх незмінності опісля процесу підлаштування каналної швидкості передачі.

Звісно, на першому етапі використання цього алгоритму спочатку потрібно знати початкові параметри системи передачі, такі як ймовірність помилки та продуктивність джерела повідомлень. Якщо ці дані представлені неявно, тобто потрібні ще розрахунки їх, то можна використати інструменти, які представлені вище у дослідженні для розрахунку потрібних початкових параметрів.

Тепер розглянемо як вирішити проблему за даним алгоритмом на прикладі. Відповідно до першого етапу визначаємо початкові параметри:

модуляція – КАМ – 4, $\alpha = 250 [\mu\text{с}]^{-1}$, $V_c = 75$ Мбіт/с, задана достовірність $P = 10^{-6}$.

Можна побачити, що в початкових умовах, навіть, модуляція є фіксована умова, але це нічого не змінює и алгоритм працює навіть в цьому випадку. Можна вважати, що перший етап в алгоритмі є ключовим тільки з точки зору підготовки розрахунків, коли ж другий та третій етапи є ключовими та найважливішими в даному алгоритмі, оскільки саме за допомогою них забезпечуються задані вимоги.

В рамках першого етапу алгоритму виконуються такі розрахунки:

- 1) Визначається енергетика каналу зв'язку h^2 (2.4) [35, с.38]:

$$h^2 = \frac{\alpha}{V_c} = \frac{250}{75} = 3,33 \text{ раз} = 5,23 \text{ дБ}$$

- 2) Тепер за типом модуляції, визначаємо ймовірність помилки на виході каналу зв'язку $p_{\text{біт}}$ (2.6) [7, 37, 38]:

$$p_6 = \frac{2}{\log_2(4)} \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{4}}\right) \cdot \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \cdot \log_2(4)}{2 \cdot (4 - 1)} \cdot 3,33} \right) = 0,00491 = 4,91 \cdot 10^{-3}$$

- 3) Визначається недостовірна продуктивність джерела повідомлень:

$$\begin{aligned} R &= 75 \cdot 2 \cdot \left(1 + 0,00491 \cdot \log_2(0,00491) + (1 - 0,00491) \log_2(1 - 0,00491)\right) \\ &= 143,29 \text{ Мбіт/с} \end{aligned}$$

Розрахунок відповідних початкових параметрів показав, що достовірність передачі інформації не задовольняється ($p_6 = 4,91 \cdot 10^{-3}$). А це значить, що можливо використати представлений алгоритм, щоб забезпечити необхідну достовірність передачі інформації (щоб ймовірність помилки на біт становила на рівні 10^{-6}), а також одночасно забезпечити умову незмінності продуктивності джерела повідомлень ($R =$

143,29 Мбіт/с). При цьому звісно буде використовуватися додатковий частотний ресурс.

Другий етап передбачає собою використання апроксимаційного рівняння для визначення кількості ресурсу необхідного для розширення смуги займаних частот (канальної швидкості передачі) який забезпечить умову сталості продуктивності. Дане рівняння матиме вигляд:

$$V_C^+ = a_1 \cdot V_C^6 + a_2 \cdot V_C^5 + a_3 \cdot V_C^4 + a_4 \cdot V_C^3 + a_5 \cdot V_C^2 + a_6 \cdot V_C + a_7, \quad (3.2)$$

де: V_C^+ – збільшений (новий) показник каналної швидкості передачі для функціонування системи передачі згідно вимог;

V_C – початкова канална швидкість передачі;

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$ – коефіцієнти рівняння, що залежать від типу модуляції та довжини блоку коду.

Можна побачити, що рівняння (3.2) є результатом поліноміальної апроксимації 6-ої степені, яка означає дуже високу точність залежності каналних швидкостей. Значення коефіцієнтів наведені у додатку А.

В рамках другого етапу необхідно обрати довжину блоку коду. Нехай довжина блоку коду становить 1000 символів ($n = 1000$). Тоді, рівняння 3.2 з підстановкою каналної швидкості передачі та коефіцієнтів з додатку А, матиме вигляд:

$$\begin{aligned} V_C^+ &= 2,9869400453 \cdot 10^{-9} \cdot (75)^6 + (-7,7787874772 \cdot 10^{-7}) \cdot (75)^5 \\ &+ 7,7226519553 \cdot 10^{-5} \cdot (75)^4 + (-3,5800234604 \cdot 10^{-3}) \cdot (75)^3 \\ &+ 7,8144152637 \cdot 10^{-2} \cdot (75)^2 + 0,3142856152 \cdot 75 \\ &+ 1,4858046263 = 83,46 \text{ Мбіт/с} \end{aligned}$$

Тобто, другий етап алгоритму визначив, що каналну швидкість передачі у системі потрібно з 75 Мбіт/с підвищити до 83,46 Мбіт/с, щоб мати можливість забезпечити умову сталості продуктивності джерела повідомлень.

Окрім дій аналогічних до першого етапу, на третьому етапі алгоритму використовуються інструменти визначення параметрів системи передачі при кодуванні, а саме: біноміальна модель генерації помилок у бінарному каналі (2.8) та методика аналізу завадостійких можливостей блокових кодів (2.9-2.10).

В рамках третього етапу виконуються такі розрахунки:

- 1) визначається енергетика каналу зв'язку h^2 (2.4) [35, с.38]:

$$h^2 = \frac{\alpha}{V_c} = \frac{250}{83,46} = 2,995 \text{ раз} = 4,76 \text{ дБ}$$

- 2) Тепер за типом модуляції, визначаємо ймовірність помилки на виході каналу зв'язку $p_{\text{бит}}$ (2.6) [7, 37, 38]:

$$p_6 = \frac{2}{\log_2(4)} \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{4}}\right) \cdot \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \cdot \log_2(4)}{2 \cdot (4 - 1)} \cdot 2,995} \right) = 0,00719$$

$$= 7,19 \cdot 10^{-3}$$

- 3) Визначення виправної здатності коду (2.8) [35, с. 62-63]:

$$10^{-6} \geq \sum_{j=t+1}^{1000} C_n^j \cdot (7,19 \cdot 10^{-3})^j \cdot (1 - 7,19 \cdot 10^{-3})^{1000-j}$$

Результатом цього розрахунку є знайдена виправна здатність коду $t = 23$.

- 4) Знаходження відстані по Хеммінгу (2.9):

$$d = 2 \cdot 23 + 1 = 47$$

- 5) За методикою аналізу завадостійких можливостей блокових кодів визначення швидкості найкращого коду по границі Плоткіна (2.10):

$$r_c = \frac{k}{n} = \frac{1000 - 2 \cdot 47 + 2 + \log_2(47)}{1000} = 0,914$$

б) Визначення продуктивності джерела повідомлень при достовірній передачі інформації (2.12) [7]:

$$\begin{aligned} R = & 83,46 \cdot \log_2(4) \cdot 0,914 \\ & \cdot (1 + (7,19 \cdot 10^{-3}) \cdot \log_2(7,19 \cdot 10^{-3}) \\ & + (1 - 7,19 \cdot 10^{-3}) \log_2(1 - 7,19 \cdot 10^{-3})) = 143,11 \text{ Мбіт/с} \end{aligned}$$

Результатом розрахунків третього етапу є отримана продуктивність передачі яка становить 143,11 Мбіт/с, але вона не є незмінною, оскільки продуктивність джерела повідомлень при недостовірній передачі становила 143,29 Мбіт/с.

Четвертий етап дозволяє досягнути умови незмінності продуктивності джерела повідомлення при розширенні частотного ресурсу за допомогою певної властивості блокових кодів. Ця властивість полягає у сталості параметрів коду у деякому частотному діапазоні. Інакше кажучи, невелика зміна каналної швидкості передачі майже не впливає на початкову бітову ймовірність помилки та зовсім не впливає на параметри кодування.

Трохи менша достовірна продуктивність за початкову означає невелике збільшення каналної швидкості (83,46 Мбіт/с) для забезпечення сталості продуктивності. Невелике збільшення каналної швидкості передачі до 83,59 Мбіт/с, коли ймовірність помилки майже не змінюється $p_6 = 7,23 \cdot 10^{-3}$, використовуючи код довжиною блоку коду $n = 1000$ з виправною здатністю $t = 23$ дозволяє домогтись двох поставлених вимог щодо заданої достовірності передачі інформації та сталості продуктивності джерела повідомлень.

П'ятий етап цього алгоритму повторює аналогічні дії третього етапу для підтвердження інформації щодо стану параметрів коду. Повторний

розрахунок відображує сталість параметрів коду відносно третього етапу, навіть, після процесу підлаштування частотного ресурсу на четвертому етапі.

Представлений алгоритм у цьому пункті може забезпечити задані вимоги щодо сталості продуктивності джерела повідомлень та необхідної достовірності передачі інформації використовуючи заздалегідь розроблені поліноміальні апроксимаційні рівняння швидкостей передачі інформації.

Висновки до розділу 3

1. Методика обрання параметрів кодування при процедурі розширення спектру та за умови сталості швидкості джерела повідомлень показала важливість початкових параметрів системи передачі для вирішення поставленої задачі. Краща енергетика зв'язку потребує меншу кількість дій для досягнення результату, а при низькій енергетиці використання даного алгоритму синтезу параметрів блокового коду не є доцільним, оскільки малого запасу може не вистачити щоб забезпечити поставлені вимоги до передачі, а подальше їх виконання вже починає знижувати продуктивність каналу зв'язку.

2. Алгоритм управління параметрами каналу зв'язку для забезпечення заданої достовірності за умов сталої продуктивності, який включає п'ять етапів, дозволяє задовольняти вимоги щодо передачі інформації за допомогою заздалегідь розроблених поліноміальних рівнянь 6-го ступеня залежностей каналних швидкостей передачі.

4 МЕТОДИКА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАНОЇ ДОСТОВІРНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ ЗА УМОВИ СТАЛОЇ ШВИДКОСТІ ДЖЕРЕЛА ПОВІДОМЛЕНЬ

4.1 Аналіз умов досягнення послуг високоякісного зв'язку за умови незмінності швидкості джерела повідомлень при зміні частотної смуги передачі

Кожного дня провідні оператори зв'язку надають послуги високоякісного зв'язку великій кількості користувачів по усьому світі. Звісно, вимоги користувачів щодо наданої послуги оператором відрізняються. При цьому можливість оператора задовольнити потреби різного сегмента споживачів у довготривалій перспективі, відображає його компетентність у телекомунікаційній сфері діяльності.

Задоволення різноманітних вимог користувачів потребує раціонального використання ресурсів каналу зв'язку для організування телекомунікаційних послуг оператором. Тобто, можна вважати, що кожний користувач висуває власні вимоги до якості передачі інформації. У даному дослідженні розглядається дві вимоги щодо передачі:

- незмінна (стала) продуктивність джерела повідомлень;
- достовірність передачі інформації, а саме бітова ймовірність помилки на виході каналу зв'язку повинна бути на рівні 10^{-6} .

Однак, можливості блокових кодів при розширенні спектральних характеристик джерела повідомлень (п. 3.1) були продемонстровані з точки зору сталості швидкості джерела повідомлень V_S (3.1). Методика передбачала збільшення частотного ресурсу до визначеного значення використовуючи параметри кодування при початковому частотному ресурсі. Варто відмітити, що завдяки інструментам, що використовуються для знаходження параметрів системи передачі, можливо розробити декілька різних методик.

Продемонстрована методика була у 4-ох випадках. Кожний з випадків характеризувався своєю початковою енергетикою. Оскільки, методика була

циклічною, то метою було визначити кількість повторних застосувань для задоволення поставлених вимог щодо параметрів системи передачі.

В представленій методиці початкова енергетика каналу зв'язку має суттєвий вплив на кількість циклічних застосувань інструментів забезпечення заданої достовірності передачі інформації. Гарна енергетика каналу зв'язку при різних вимогах також є різною. Наприклад, використання модуляції ФМ-2 (4.1) при енергетичному ресурсі каналу зв'язку який перевищує показник $h^2 = 10,5$ дБ, означає можливість виконувати передачу інформації без використання кодування задовольняючи вимоги щодо достовірності (рис. 4.1).

$$p_b = 1 - f(z), \quad (4.1)$$

де: $f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}$ – стандартний нормальний інтегральний розподіл;

$z = \sqrt{2 \cdot h^2[\text{раз}]}$ – зв'язок коефіцієнту розподілу з енергетичним показником.

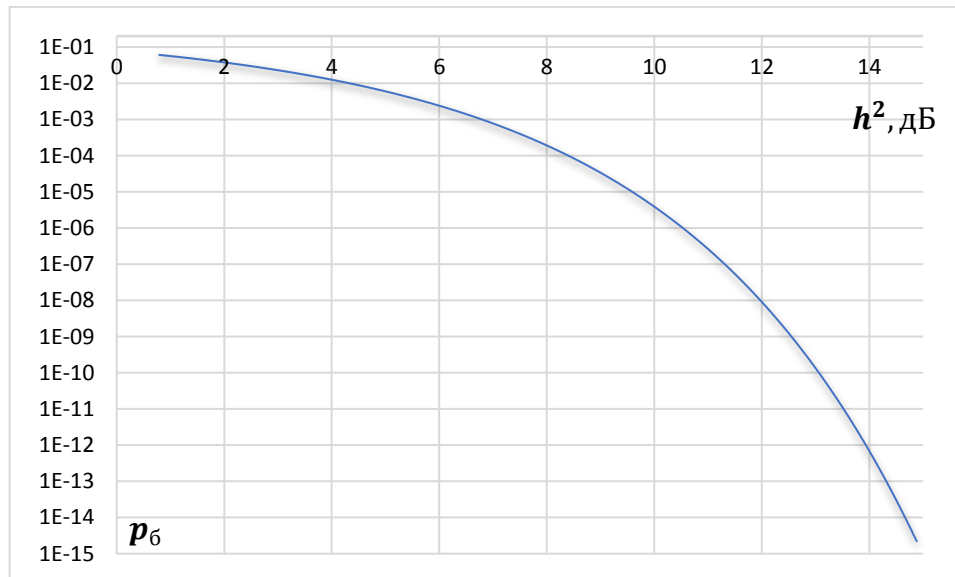


Рисунок 4.1 – Залежність бітової ймовірності помилки від енергетики каналу зв'язку (ФМ-2)

Аналізуючи залежності представлені рисунками 4.1, 3.1 та 3.2, можна зробити висновок, що енергетика каналу зв'язку яка дорівнює або вище $h^2 = 10,5$ дБ одразу забезпечує вимоги достовірності передачі інформації ($P_6 = 10^{-6}$). Звісно, у такому випадку, застосування цієї методики є надлишковою, оскільки достовірність передачі починає бути надмірною, а певна кількість збільшеного частотного ресурсу починає витрачатися на передачу некорисної інформації. Але варто відмітити, що надлишкове застосування цієї методики за такої енергетики каналу зв'язку має спільну рису з першими двома випадками (рис. 3.1, рис. 3.2), а саме, кількість циклічних застосувань методики дорівнює одному разу.

Випадки (рис. 3.1, рис. 3.12) застосування методики при енергетичному ресурсі у каналі зв'язку, що відповідає рівням $h^2 = 9$ дБ та $h^2 = 7$ дБ, показують наявність досить гарного енергетичного запасу для задоволення поставлених вимог щодо якості передачі. В обох випадках досить одного циклу методики для досягнення сталості швидкості джерела продуктивності при збільшенні каналної швидкості передачі. Подальше зниження початкового енергетичного ресурсу (рис. 3.3) викликає зростання циклічних застосувань за методикою.

В наступному випадку, де початковий енергетичний рівень $h^2 = 5$ дБ (рис. 3.3), за методикою було виконано три циклічні дії з визначення розширеного значення каналної швидкості передачі і параметрів завадостійкого кодування. А останній випадок (рис. 3.4), взагалі показує, що дев'ять циклічних дій по знаходженню параметрів системи передачі за методикою не можуть задовольнити вимоги щодо достовірності передачі інформації. Причому, четвертий цикл є ключовим, оскільки є останнім з точки зору покращення параметрів системи передачі, а усі наступні лише погіршують достовірність передачі.

Варто наголосити, що з метою висвітлити можливості блокових кодів, дана методика була представлена при фіксованій довжині блоку коду ($n = 500$). А це означає, що обравши код з більшою довжиною коду, який є

кращим (рис. 2.10-2.14), можна досягти меншої кількості циклічних дій при застосуванні даної методики для забезпечення вимог щодо сталості швидкості джерела повідомлень та достовірності передачі інформації.

У підсумку варто відзначити, що головними умовами досягнення послуг високоякісного зв'язку за вимоги незмінності швидкості джерела повідомлень при зміні частотної смуги передачі є гарна енергетика каналу зв'язку та використання коду з якомога більшою довжиною блоку коду.

4.2 Вирішення задачі забезпечення заданої достовірності за умови сталої продуктивності джерела повідомлень при зміні частотної смуги передачі

Для вирішення поставленої задачі забезпечення заданої достовірності при умові сталої продуктивності у процесі збільшення частотного ресурсу системи передачі потрібно звернути увагу на один інструментів наведений у другому пункті дослідження – біноміальну модель генерації помилок у каналі зв'язку (2.8). Саме вона вносить до будь-якого алгоритму, методики чи задачі, де використовується, ітеративний характер.

Під ітерацією розуміємо повторення процесу знаходження виправної здатності блоку коду змінюючи параметр довжини блоку коду. Обрання параметру довжини блоку коду на етапі використання цієї моделі дуже суттєво впливає на визначення всіх інших параметрів системи передачі, особливо на результуючу продуктивність джерела повідомлень (рис. 2.14), вимоги до якої чітко визначені у даному дослідженні. Окрім, параметру довжини блоку коду є ще енергетичний показник α (2.3), та тип модуляції, які ускладнюють розробку однієї універсальної методики для всіх можливих параметрів системи передачі.

Умови щодо зміни частотної смуги передачі нічого не кажуть про показник розширення, наприклад, удвічі, утричі і тощо. У зв'язку з цим, будемо вважати, що збільшення частотного ресурсу відбувається за деякою

залежністю від інших параметрів. Тому, для вирішення цієї задачі введемо ще деякі обмеження: сталий тип модуляції КАМ-16 та енергетичний показник $\alpha = 250 [\mu\text{с}^{-1}]$ та довжина блоку коду $n = 500$. Для прикладу нехай канална швидкість передачі буде $V_c = 40$ Мбіт/с.

Використаємо 2.4-2.12 та виконаємо опис поставленої задачі графічно на рисунку 4.2 та занесемо параметри системи відповідно до станів у таблицю 4.1.

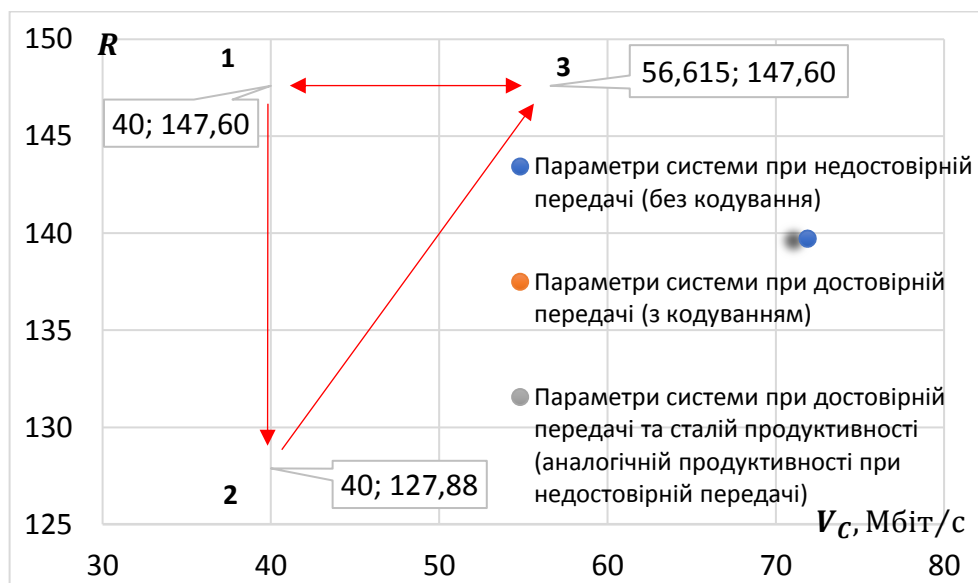


Рисунок 4.2 – Графічна постановка задачі

Таблиця 4.1 – Відповідність станів та параметрів системи передачі

№ стану	V_c , Мбіт/с	h^2 , дБ	p_6	t	r_c	R , Мбіт/с
1	40	7,96	$9,51 \cdot 10^{-3}$	–	–	147,60
2	40	7,96	$9,51 \cdot 10^{-3}$	18	0,866	127,88
3	56,615	6,45	$2,26 \cdot 10^{-2}$	30	0,772	147,60

Отже, рисунок 4.2, відображує, що дослідження аналізує три стани системи передачі інформації:

– 1 стан системи – недостовірна передача інформації. В цьому стані система передачі не використовує кодування, але це не означає що при

певних енергетичних умовах передача не є достовірною. Наприклад, при гарному енергетичному показнику та використанню модуляції нижчої кратності ймовірність бітової помилки на виході каналу зв'язку може бути набагато меншою від заданої вимогами - ($P_6 = 10^{-6}$). Тому розглядаються ситуації, коли цей стан системи не задовольняє вимоги щодо достовірності;

- 2 стан системи – достовірна передача інформації. Оскільки перший стан системи передачі розглядається коли не задовольняється вимога щодо достовірності, то використовується надлишкове кодування для забезпечення заданої ймовірності помилки на виході каналу зв'язку при тих же початкових параметрах системи передачі (показнику α , канальній швидкості, типу модуляції). Водночас застосування завадостійкого кодування змушує витратити ресурси системи на передачу некорисної інформації, що відповідає зниженню продуктивності джерела повідомлень;

- 3 стан системи – достовірна передача інформації при розширенні частотного ресурсу. У цьому стані система передачі передбачає використання завадостійкого кодування, параметр довжини блоку коду якого відповідає обраному при визначенні параметрів кодування у 2-ому стані системи. Також даний стан потребує збільшення частотного ресурсу для передачі, враховуючи властивість кодування відбирати деяку кількість ресурсу на передачу некорисної інформації. Але варто пам'ятати про вимогу сталості продуктивності, що означає потребу неабиякого збільшення, а до певного значення канальної швидкості передачі.

Також, не варто забувати, про взаємозв'язок частотного V_C та енергетичного ресурсу h^2 (2.4), оскільки збільшення першого обумовлює зменшення другого, що має ланцюговий вплив на параметри системи передачі – їх зміну. Саме тому головною проблемою при вирішенні даної задачі є невідомий показник частотного ресурсу до якого потрібно збільшити. Однак, навіть при фіксованому показнику $\alpha = 250 [\mu\text{с}^{-1}]$, типу модуляції КАМ-16, та довжині блоку коду $n = 500$, додавання канальної швидкості передачі та постійне перераховування параметрів системи, з

надією потрапити у необхідний показник каналної швидкості, не можна вважати результатом вирішення поставленої задачі.

Рішення цієї задачі потребує аналізу формул продуктивності (2.7, 2.12) для наведених (рис. 4.2) станів системи передачі (підставимо значення до формул):

- недостовірна передача інформації:

$$147,6 = 40 \cdot \log_2(16) \cdot \left(1 + (9,51 \cdot 10^{-3}) \cdot \log_2(9,51 \cdot 10^{-3}) + (1 - 9,51 \cdot 10^{-3}) \cdot \log_2(1 - 9,51 \cdot 10^{-3})\right)$$

- достовірна передача інформації:

$$127,88 = 40 \cdot \log_2(16) \cdot 0,866 \cdot \left(1 + (9,51 \cdot 10^{-3}) \cdot \log_2(9,51 \cdot 10^{-3}) + (1 - 9,51 \cdot 10^{-3}) \log_2(1 - 9,51 \cdot 10^{-3})\right)$$

- достовірна передача інформації з розширенням частотного ресурсу та сталій продуктивності джерела повідомлень:

$$147,6 = 56,615 \cdot \log_2(16) \cdot 0,772 \cdot \left(1 + (2,26 \cdot 10^{-2}) \log_2(2,26 \cdot 10^{-2}) + (1 - (2,26 \cdot 10^{-2})) \log_2(1 - (2,26 \cdot 10^{-2}))\right)$$

Аналіз цих формул демонструє певні зв'язки між представленими станами системи передачі. Перший та другий стан системи пов'язані спільною каналною швидкістю передачі $V_C = 40$ Мбіт/с та ймовірністю бітової помилки $p_{\text{біт}} = 9,51 \cdot 10^{-3}$. На перший погляд, третій стан системи не має нічого спільного з першим та другим станом, окрім:

– рівності продуктивності відносно стану системи при недостовірній передачі (1-го стану);

– наявності завадостійкого кодування відносно стану системи при достовірній передачі (2-го стану), хоча і з різною виправною здатністю.

Втім, саме дослідження різниці параметрів третього стану системи від інших станів є ключом для вирішення задачі.

Досліджуючи різницю параметрів при різних станах системи варто звернути на такі параметри: каналну швидкість передачі, швидкість кодування та ймовірність бітової помилки. Застосовуючи інструменти представлені у другому розділі магістерської роботи (2.4-2.12), можна провести велику кількість розрахунків за допомогою пакетів прикладних програм для вирішення технічних обчислень аналогічних прикладу зображеному на рисунку 3.2. Якраз по результатам обчислень можна виконати розробку апроксимаційних рівнянь виділених параметрів, які можуть стати гарним результатом вирішення поставленої задачі.

Хоча будь-який з трьох параметрів за результатом апроксимації представлений у вигляді рівняння може бути результатом вирішення даної задачі, але між ними і суттєва різниця. Наприклад, виконана апроксимація параметру швидкості кодування (опис залежності цього параметру між 2-им та 3-ім станом системи передачі (рис. 4.2)) буде передбачати етап знаходження параметрів кодування перед застосуванням отриманої апроксимаційної залежності. А виконана апроксимація параметру ймовірності бітової помилки (опис залежності цього параметру між 2-им та 3-ім станом системи передачі (рис. 4.2)) передбачає знаходження параметру, який потребує водночас оберненого розрахунку формули 2.6 для визначення енергетичного показника h^2 з подальшим визначенням каналної швидкості передачі V_C . Тобто, апроксимація параметрів швидкості кодування та ймовірності бітової помилки не є доцільною, через деякі зайві розрахунки. У свою чергу, виконана апроксимація параметру каналної швидкості передачі буде раціональною через вимоги поставлені до задачі, оскільки дозволить

одразу знаходити показник частотного ресурсу до якого потрібно збільшити цей параметр аби задовольнити вимогу сталості продуктивності. При цьому, після використання апроксимаційного рівняння, достатньо лише один раз застосувати інструменти для визначення параметрів системи (2.4-2.12), щоб вирішити поставлену задачу.

Застосуємо поліноміальну апроксимацію 6-го ступеня для підвищення достовірності апроксимації. Рівняння матиме вигляд (2.14):

$$V_C^+ = a_1 \cdot V_C^6 + a_2 \cdot V_C^5 + a_3 \cdot V_C^4 + a_4 \cdot V_C^3 + a_5 \cdot V_C^2 + a_6 \cdot V_C + a_7,$$

де: V_C^+ – збільшений (новий) показник каналної швидкості передачі для функціонування системи передачі згідно вимог;

V_C – початкова канална швидкість передачі;

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$ – коефіцієнти рівняння, що залежать від типу модуляції та довжини блоку коду.

Таблиця з коефіцієнтами цього апроксимаційного рівняння представлена у додатку А. Окрім цього, там наведені коефіцієнти для рівняння при інших початкових параметрах (інші типи модуляції та параметри довжини блоку коду).

Побудуємо графічно реальні залежності каналних швидкостей за якими було виконано апроксимації. Реальні розрахунки проводилися при таких умовах:

- фіксований показник $\alpha = 250 [\mu\text{с}^{-1}]$;
- використання чотирьох типів модуляції: КАМ-4, КАМ-16, КАМ-64, КАМ-256;
- використання кодування з такими довжинами блоку коду: $n = 250, 500, 750, 1000$.

Варто пам'ятати, що інший показник α робить надані апроксимаційні залежності недійсними. При цьому достовірність представлених апроксимаційних рівнянь знаходиться на рівні $R^2 = 0,999$.

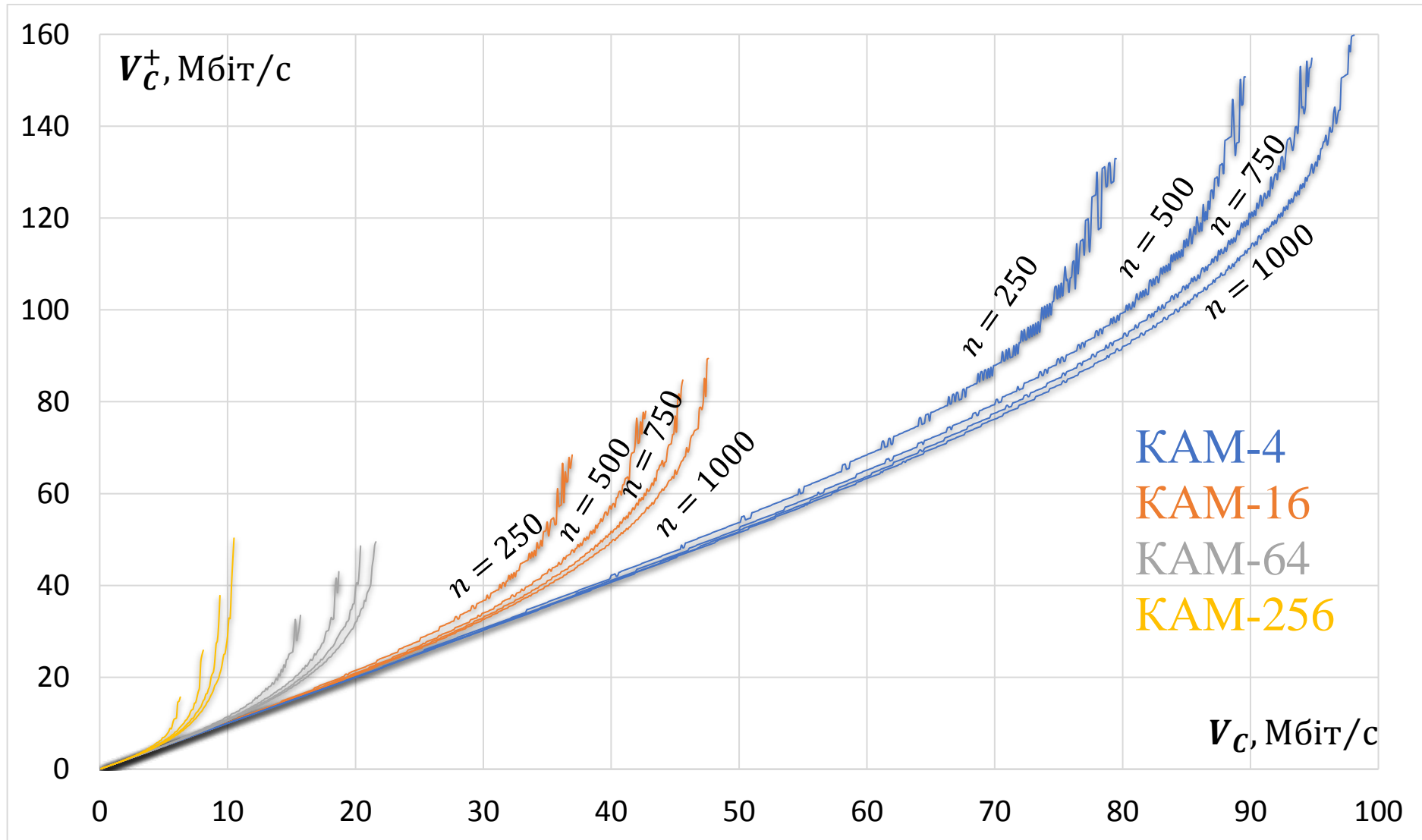


Рисунок 4.3 – Реальна залежність каналних швидкостей

Аналізуючи рисунок 4.3, можна побачити, що модуляція вищої кратності обумовлює використання нижчої смуги частот для передачі інформації. Код з більшою довжиною блоку, навпаки, дозволяє підвищувати смугу використаних частот. Окрім цього, варто звернути увагу на те, що кожна залежність обривається при певному показнику, який, у свою чергу, характеризує каналну швидкість передачі за якої продуктивність є максимальною.

Дані апроксимаційні залежності використовуються у алгоритмі управління параметрами каналу зв'язку для забезпечення заданої достовірності за умови сталої продуктивності.

4.3 Аналіз впливу зміни кратності модуляції з подальшим розширенням частотної смуги передачі на поставлені умови щодо достовірності передачі та незмінності продуктивності джерела повідомлень

У попередньому пункті була вирішена задача забезпечення заданої достовірності передачі інформації за умови сталої продуктивності джерела, де результат був представлений у вигляді поліноміальних апроксимаційних рівнянь 6-го ступеня. Наразі, потрібно проаналізувати вплив зміни кратності модуляції на стан системи передачі, який задовольняє вимоги щодо достовірності передачі та сталості продуктивності джерела повідомлень.

Для аналізу використаємо задачу вирішену у попередньому пункті (рис. 4.2). Коли система передачі відповідає таким параметрам: $\alpha = 250 [\mu\text{с}^{-1}]$, модуляція – КАМ-16, канална швидкість – $V_c = 56,62$ Мбіт/с, довжина блоку коду $n = 500$. Аналіз виконаємо у двох випадках:

- 1) модуляція типу КАМ-16 змінилася на модуляцію типу КАМ-4;
- 2) модуляція типу КАМ-16 змінилася на модуляцію типу КАМ-64.

В обох випадках після зміни типу модуляції необхідно проаналізувати вплив цієї зміни на параметри системи передачі з метою оцінки міри задоволення поставлених вимог. У випадку незадоволення вимог якості

передачі повторно вирішити задачу забезпечення заданої достовірності за умови сталої продуктивності використовуючи новий тип модуляції.

Розглянемо два варіанти зміни типу модуляції: зміна модуляції при сталому параметрі виправної здатності коду та зміну модуляції з визначенням нової виправної здатності коду.

Виконаємо графічно побудову першого варіанту зміни типу модуляції при сталому параметру виправної здатності коду. Тобто, в цьому випадку всі параметри завадостійкого кодування (довжина блоку коду, виправна здатність та швидкість кодування) будуть дорівнювати аналогічним параметрам у третьому стані системи (рис. 4.2, 4.4). Параметри системи передачі для кожного стану можна побачити у таблиці 4.2.

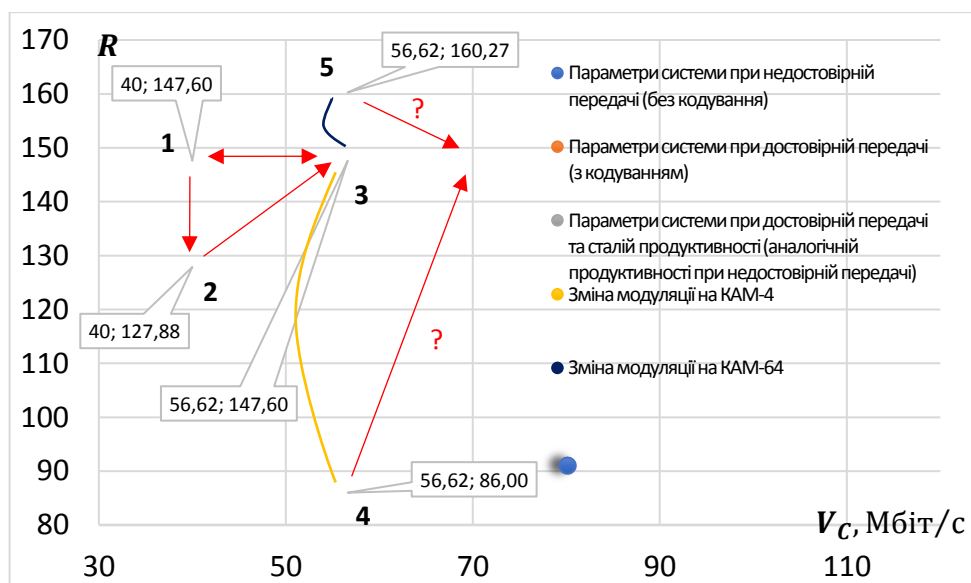


Рисунок 4.4 – Графічне відображення першого варіанту зміни кратності модуляції

Таблиця 4.2 – Відповідність станів та параметрів системи передачі (згідно рис. 4.4)

№ стану	V_c , Мбіт/с	Тип модуляції	h^2 , дБ	p_6	t	r_c	p_6 після код-ння	R , Мбіт/с
1	40	КАМ – 16	7,96	$9,51 \cdot 10^{-3}$	–	–	–	147,60
2	40	КАМ – 16	7,96	$9,51 \cdot 10^{-3}$	18	0,866	$5,54 \cdot 10^{-7}$	127,88
3	56,615	КАМ – 16	6,45	$2,26 \cdot 10^{-2}$	30	0,772	$6,59 \cdot 10^{-7}$	147,60
4	56,615	КАМ – 4	6,45	$1,48 \cdot 10^{-3}$	30	0,772	$2,05 \cdot 10^{-39}$	86,00
5	56,615	КАМ – 64	6,45	$7,62 \cdot 10^{-2}$	30	0,772	$9,03 \cdot 10^{-1}$	160,27

На рисунку 4.4 представлений випадок, коли усі три стани функціонування системи (3, 4 та 5), мають такі однакові параметри системи передачі: каналну швидкість передачі $V_c = 56,62$ Мбіт/с, швидкість кодування $r_c = 0,772$. Тобто, на різницю продуктивності джерела повідомлень впливає лише тип модуляції та залежна від неї ймовірність бітової помилки (2.12) (рис. 2.7). Зниження кратності модуляції до КАМ-4 обумовлює падіння продуктивності джерела до $R = 86$ Мбіт/с, а збільшення кратності модуляції обумовлює зростання продуктивності до $R = 160,27$ Мбіт/с. Іншими словами, зміна кратності модуляції змінює параметри системи передачі таким чином, що сталість продуктивності згідно вимоги порушується.

Однак, варто звернути увагу щодо вимог про забезпечення достовірності. У даному випадку, зміна модуляції на КАМ-4 дозволяє коду довжиною блоку $n = 500$, з виправною здатністю $t = 30$, який має швидкість кодування $r_c = 0,772$, забезпечувати достовірність передачі інформації на рівні $p_6 = 2,05 \cdot 10^{-39}$. Як бачимо, даний код задовольняє вимоги щодо достовірності з надлишком і має дуже гарний запас можливостей при

розширенні спектральних характеристик джерела повідомлень. При цьому, код з аналогічними параметрами зовсім не може забезпечити достовірність передачі згідно вимог, якщо модуляції змінюється до КАМ-64. Тоді він забезпечує достовірність на рівні $p_6 = 9,03 \cdot 10^{-1}$, що не задовольняє вимоги. Для забезпечення сталості продуктивності джерела повідомлень при зміні модуляції на КАМ-4 достатньо збільшити каналну швидкість передачі до показника $V_C = 108,33$ Мбіт/с (рис. 4.5). Таке вирішення можливе завдяки гарному запасу можливостей блокового коду при цій модуляції. Навіть, при збільшеній каналній швидкості від буде забезпечувати достовірність передачі інформації на рівні $p_6 = 2,45 \cdot 10^{-10}$. Інакше кажучи, збільшення каналної швидкості передачі для задоволення умови сталості продуктивності джерела повідомлень не заважає даному коду забезпечувати достовірність передачі інформації з надлишком. Нажаль, вирішити ситуацію таким способом при збільшенні кратності модуляції до КАМ-64 неможливо. Насамперед, потрібно знижувати каналну швидкість до $V_C = 49,3$ Мбіт/с для досягнення рівності продуктивності, але це однаково не задовольнить вимоги щодо достовірності $p_6 = 6,89 \cdot 10^{-1}$ (рис. 4.5). Причому застосування недостовірної передачі (2.7) без використання кодування матиме кращі характеристики достовірності, оскільки ймовірність бітової помилки на виході каналу зв'язку буде дорівнювати $p_6 = 6,67 \cdot 10^{-2}$.

Аналіз першого варіанту зміни кратності модуляції показав, що задоволення вимог щодо достовірності передачі та сталості продуктивності джерела можливе лише при зниженні кратності модуляції у разі збільшення смуги частот для передачі.

Для більш кращого розуміння проведених дій, результати виконання аналізу першого варіанту зміни типу модуляції представлено графічно на рисунку 4.5, а параметри системи у станах 6 та 7 наведені у таблиці 4.3. Стрілками позначені переходи між станами системи передачі (пунктирні означають процес зміни частотного ресурсу опісля зміни типу модуляції).

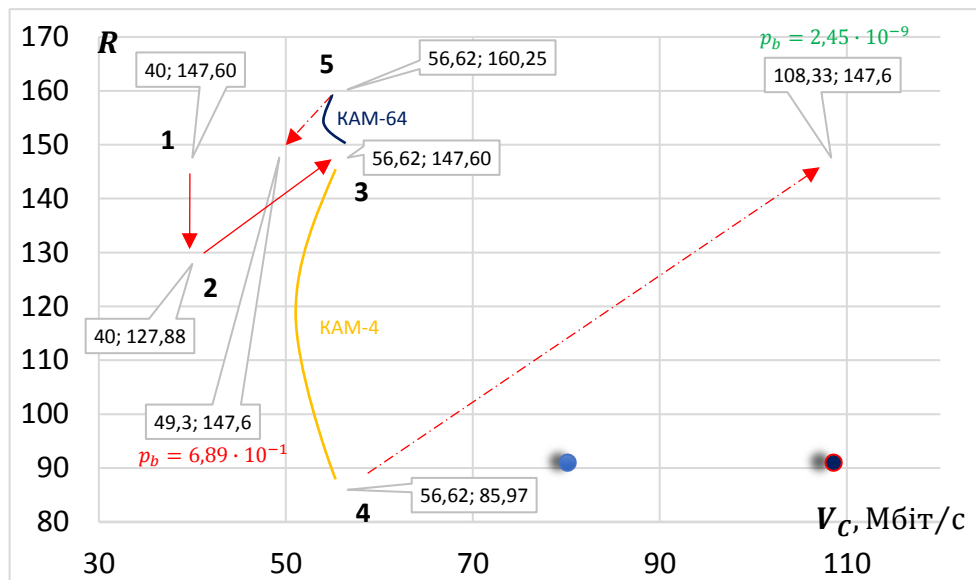


Рисунок 4.5 – Результат аналізу впливу зміни типу модуляції при сталих параметрах кодування

Таблиця 4.3 – Параметри системи передачі у 6 та 7 стані функціонування

№ стану	V_c , Мбіт/с	Тип модуляції	h^2 , дБ	p_6	t	r_c	p_6 після кодування	R , Мбіт/с
6	49,3	КАМ – 64	7,05	$6,67 \cdot 10^{-2}$	30	0,772	$6,89 \cdot 10^{-1}$	147,60
7	108,33	КАМ – 4	3,63	$1,58 \cdot 10^{-2}$	30	0,772	$2,45 \cdot 10^{-10}$	147,60

Розглянемо другий варіант зміни типу модуляції, коли відбувається зміна параметру виправної здатності коду. Варто пам'ятати, що довжина блоку коду залишається сталою і дорівнює $n = 500$. Для визначення нових параметрів кодування будемо використовувати ті ж самі інструменти, що були представлені у другому розділі цієї роботи (2.8-2.11). Для цього виконаємо графічне відображення цього варіанту на рисунку 4.6, а дані параметрів системи у кожному стані наведемо у таблиці 4.4. Знаки питання означають пошук показника необхідного частотного ресурсу для вирішення задачі в умовах поставлених вимог щодо якості передачі та сталості

продуктивності джерела (характер зміни може бути як у додатну, так і від'ємну сторону).

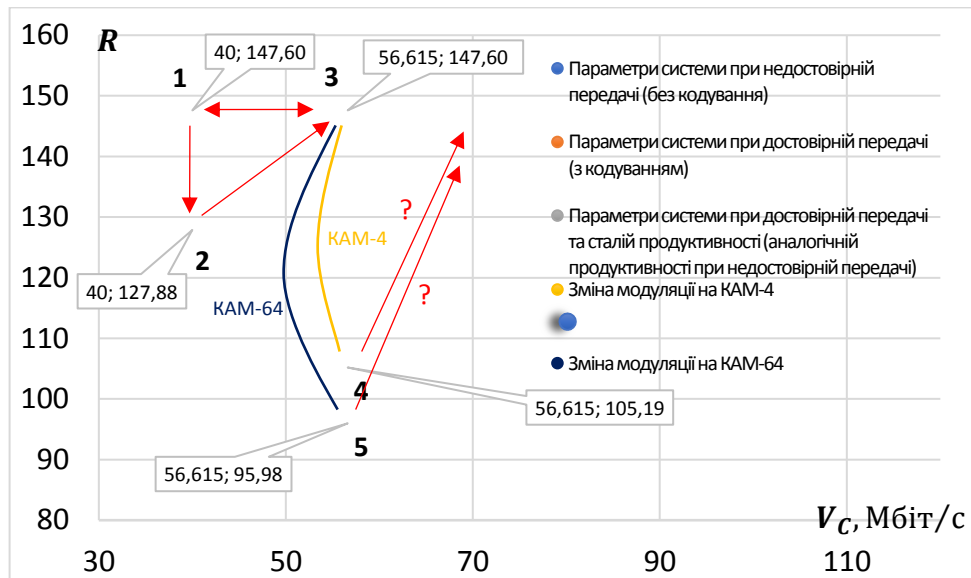


Рисунок 4.6 – Графічне відображення другого варіанту зміни кратності модуляції

Таблиця 4.4 – Відповідність параметрів системи кожному стану при другому варіанті зміни типу модуляції

№ стану	V_c , Мбіт/с	Тип модуляції	h^2 , дБ	p_6	t	r_c	p_6 після кодування	R , Мбіт/с
1	40	КАМ – 16	7,96	$9,51 \cdot 10^{-3}$	–	–	–	147,60
2	40	КАМ – 16	7,96	$9,51 \cdot 10^{-3}$	18	0,866	$5,54 \cdot 10^{-7}$	127,88
3	56,615	КАМ – 16	6,45	$2,26 \cdot 10^{-2}$	30	0,772	$6,59 \cdot 10^{-7}$	147,60
4	56,615	КАМ – 4	6,45	$1,48 \cdot 10^{-3}$	8	0,944	$8,80 \cdot 10^{-8}$	105,19
5	56,615	КАМ – 64	6,45	$7,62 \cdot 10^{-2}$	69	0,462	$7,55 \cdot 10^{-7}$	95,98

За рисунком 4.6, можна побачити, що підвищена кратність модуляції з новою виправною здатністю коду може задовольнити вимоги щодо

достовірності передачі інформації. При цьому, будь-яка зміна типу модуляції (збільшення або зменшення кратності) порушує вимоги щодо сталості продуктивності джерела повідомлень. Так, зниження кратності модуляції до КАМ-4 знижує продуктивність джерела повідомлень до показника $R = 105,19$ Мбіт/с, а підвищення кратності модуляції до КАМ-64 знижує продуктивність джерела повідомлень до показника $R = 95,98$ Мбіт/с.

Також варто відзначити, що у даному випадку при обох типах модуляції (КАМ-4 та КАМ-64) код вже не має таких запасів можливостей для здійснення процесу розширення частотного ресурсу, щоб забезпечити обидві умови одночасно: сталість продуктивності джерела повідомлень ($R = 147,6$ Мбіт/с) та ймовірність помилки на виході декодера має бути на рівні $P_6 = 10^{-6}$. Саме тому забезпечення обох вимог потрібно одночасно збільшувати частотний ресурс та перераховувати параметри кодування. Аналогічно до методики розрахунків попереднього пункту, за допомогою прикладних пакетів програм, використовуючи інструменти (2.4-2.12) та маючи крок каналної швидкості передачі $V_c = 0,1$ Мбіт/с, можна визначити, що зміна типу модуляції на КАМ-4 потребує збільшення частотного ресурсу до показника $V_c = 93,84$ Мбіт/с та підвищення виправної здатності коду до показника $t = 19$, щоб задовольняти поставлені вимоги до якості передачі та сталості продуктивності джерела повідомлень. Функціонування системи с такими параметрами наведено під станом 6 у таблиці 4.5 та на рисунку 4.7.

Таблиця 4.5 – Параметри 6-го стану системи передачі при зміні типу модуляції та виправної здатності коду

№ стану	V_c , Мбіт/с	Тип модуляції	h^2 , дБ	p_6	t	r_c	p_6 після кодування	R , Мбіт/с
6	93,84	КАМ – 4	4,26	$1,05 \cdot 10^{-2}$	19	0,859	$5,68 \cdot 10^{-7}$	147,60

Дуже цікавою для аналізу є зміна типу модуляції на КАМ-64. Якщо збільшувати частотний ресурс та перераховувати параметри кодування, можна буде помітити, що продуктивність джерела повідомлень буде при цьому зменшуватися, а оскільки значення продуктивності зменшилось при зміні модуляції, то потрібно продуктивність джерела, навпаки, збільшувати. При цьому зменшення частотного ресурсу цьому випадку також не вирішує проблему щодо сталості продуктивності, оскільки буде спостерігатися процес зростання продуктивності до певного значення $R = 99,56$ Мбіт/с, після чого буде спостерігатися знову спад продуктивності. Тобто, при енергетичному показнику $\alpha = 250$ [$\mu\text{с}^{-1}$] та довжині блоку коду $n = 500$, модуляція КАМ-64 має екстремум продуктивності джерела повідомлень, що дорівнює $R = 99,56$ Мбіт/с і ніяким чином не може забезпечити вимоги щодо сталості продуктивності без пом'якшення вимог щодо достовірності передачі інформації (рис. 4.7).

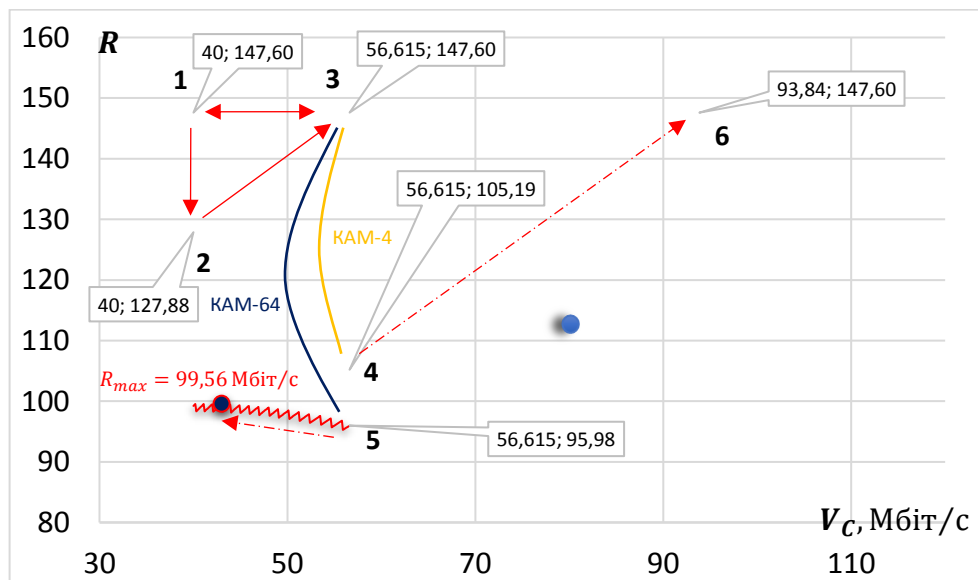


Рисунок 4.7 – Результат аналізу впливу зміни типу модуляції при змінних параметрах кодування

Аналіз обох варіантів зміни типу модуляції показує, що підвищення кратності модуляції не може задовольнити умову сталості джерела

повідомлень при підтриманні достовірності передачі інформації на рівні $P_6 = 10^{-6}$. Зниження кратності модуляції при сталих параметрах коду дозволяє забезпечити вимоги щодо достовірності передачі та сталості продуктивності джерела та водночас суттєво збільшити частотну смугу, що використовується.

4.4 Оцінка доцільності витрачених ресурсів каналу зв'язку при наближенні до екстремуму продуктивності джерела повідомлень

У попередньому пункті при аналізі зміни типу модуляції була змодельована ситуація, коли поставлені вимоги щодо якості передачі інформації перешкождали вимогам сталості продуктивності джерела повідомлень. Тоді, процес зменшення частотного ресурсу дозволив знайти екстремум продуктивності джерела повідомлень при використанні модуляції КАМ-64 та коду довжиною блоку $n = 500$.

Якраз у таких випадках необхідно розуміти наскільки доцільно витрачати ресурс каналу зв'язку на те, щоб досягти максимальної продуктивності джерела повідомлень. Використовуючи дослідження щодо екстремумів продуктивності побудуємо дані залежності на рисунку 4.8.

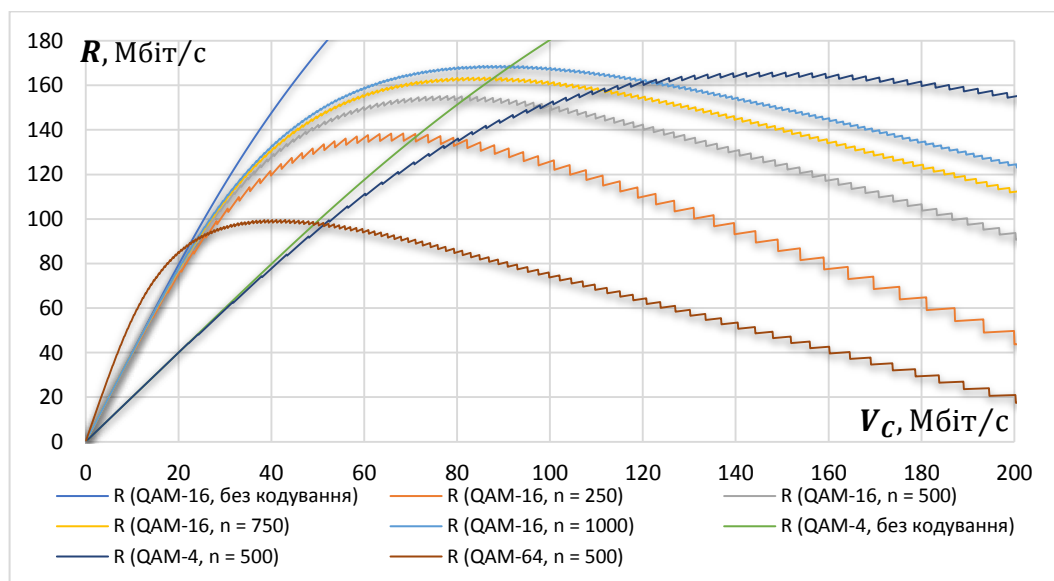


Рисунок 4.8 – Екстремуми продуктивності джерела повідомлень

Одразу варто сказати, що система передачі не повинна працювати на межі своїх можливостей, оскільки це призводить до швидшої деградації її елементів. Саме тому інженери при проектуванні планують так, щоб запас можливостей системи становив десь 30 %. Такий же підхід реалізується для використання ресурсів каналу зв'язку. Варто зауважити, що частотний ресурс у сучасному світі є дуже дорогим задоволенням, тому до нього потрібно відноситись дуже обережно. Тому процес зменшення частотного ресурсу також варто характеризувати як витрату ресурсу каналу зв'язку.

Звернувши увагу на рисунок 4.8, можна побачити, що продуктивність з використанням завадостійкого кодування завжди має екстремум, яка б модуляція не використовувалася. Але модуляції підвищеної кратності має менший екстремум продуктивності. Ця властивість не дозволила досягти умови сталості продуктивності у попередньому пункті дослідження.

Потрібно проводити оцінку з точки зору початкових параметрів системи передачі, але їх може бути незлічена кількість. Виконаємо оцінку витраченого ресурсу для наближення до екстремуму з точки зору характеру зміни самої продуктивності. З цього погляду, кожену представлену продуктивність умовно можна поділити на три зони:

- дуже швидке зростання продуктивності R за рахунок переважання швидкості зростання параметру каналної швидкості передачі V_C над швидкістю падіння параметру швидкості кодування r_c ;
- плавне зростання продуктивності R за рахунок стабілізації швидкості зростання параметру каналної швидкості передачі V_C та швидкості падіння параметру швидкості кодування r_c ;
- повільне спадання продуктивності R за рахунок переважання швидкості падіння параметру швидкості кодування r_c над швидкістю зростання параметру каналної швидкості передачі V_C .

При цьому дослідження показують, що максимум продуктивності (екстремум) відповідає екстремуму інформаційної ефективності. Інакше кажучи, при таких параметрах система працює найефективніше. Це основна

причина необхідності наближення до екстремуму продуктивності джерела повідомлень.

Відобразимо умовний поділ продуктивності на зони на рисунку 4.9.

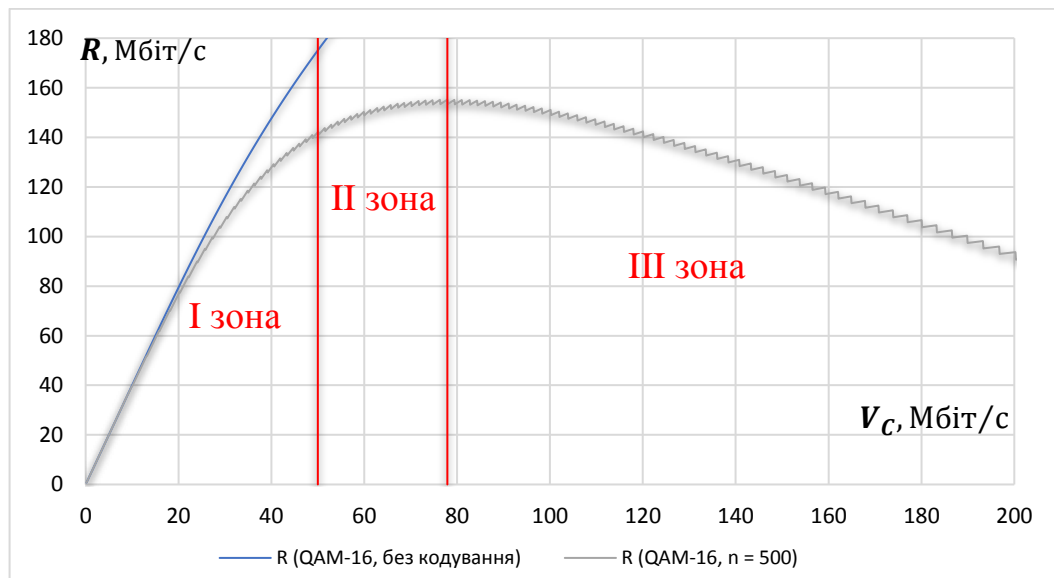


Рисунок 4.9 – Умовний поділ продуктивності на зони

Якщо система передачі даних функціонує за параметрами, коли продуктивність джерела повідомлень можна віднести до I зони, то не завжди доцільно буде витратити частотний ресурс каналу зв'язку. В такому випадку потрібно витратити дуже суттєву кількість частотного ресурсу. Але якщо навпаки трохи зменшити його, можна здійснювати передачу інформації без використання кодування. Окрім економії частотного ресурсу, з'являється можливість фінансово зекономити на джерелі повідомлень, що використовується. Це спрощує побудову джерела повідомлень (може не містити кодер). А відсутність певного елемента у пристрої зменшує його вартість. Також варто зауважити, що при передачі з кодуванням у цій зоні, показник збільшення частотного ресурсу може відповідати подвійному чи потрійному збільшенню продуктивності, а це гарна властивість.

Аналіз II зони показує, що залежність продуктивності від швидкості кодування в ній майже прямо пропорційна. Система передачі яка функціонує

у цій зоні витратить менше частотного ресурсу для досягнення екстремуму продуктивності, але при цьому зріст самої продуктивності буде посереднім.

Належність продуктивності системи передачі до III зони означає, що переважна кількість ресурсу витрачається на передачу некорисної інформації. Збільшення частотного ресурсу призводить до подальшого зниження продуктивності системи (рис. 4.8-4.9), оскільки знижується енергетика каналу зв'язку (рис. 2.1) і код повинен володіти більшою виправною здатністю (рис. 2.10), щоб задовольнити вимоги до достовірності. А збільшена виправна здатність відповідає зменшенню швидкості кодування (рис. 2.11-2.12). Тому збільшення частотного ресурсу в цій зоні призводить до погіршення показника інформаційної ефективності. При такій ситуації потрібно зменшувати частотний ресурс максимально можливо для досягнення екстремуму продуктивності.

Розглянувши рисунок 4.8 можна помітити, що досягнення екстремуму продуктивності можливо також при таких випадках: зміни довжини блоку коду та зміни типу модуляції. Наприклад, система функціонує при таких параметрах: канална швидкість передачі становить $V_C = 60$ Мбіт/с, модуляція QAM-16, довжина блоку коду $n = 500$, а запас частотного ресурсу становить $V_C = 10$ Мбіт/с. За таких параметрів продуктивність джерела становить $R = 148,83$ Мбіт/с.

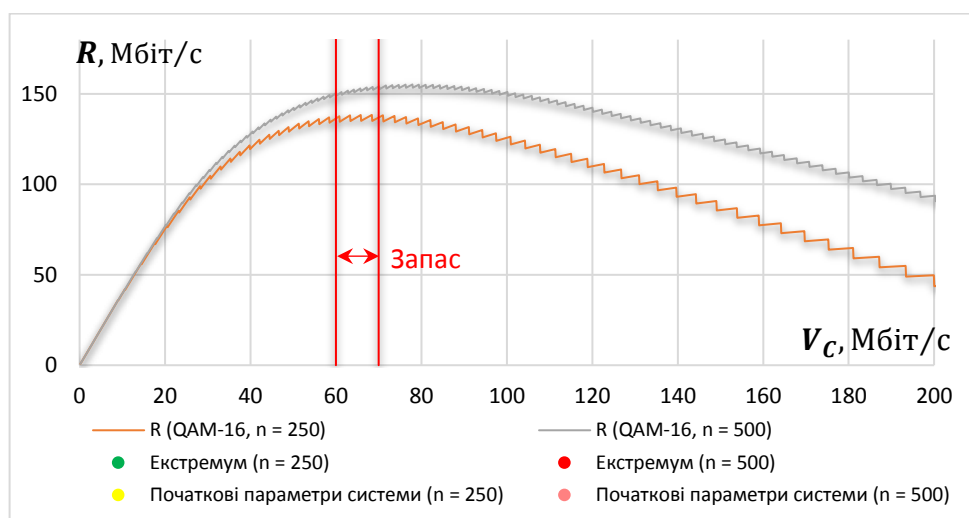


Рисунок 4.10 – Досягнення екстремуму при зміні довжини блоку коду

Використання усього запасу частотного ресурсу дозволить збільшити каналну швидкість передачі до $V_C = 70$ Мбіт/с і досягнути продуктивності $R = 154,07$ Мбіт/с, але все одно не вдасться досягнути екстремуму, який становить $R = 155,2$ Мбіт/с при $V_C = 77,9$ Мбіт/с. При цьому змінивши довжину блоку коду на $n = 250$, достатньо збільшити каналну швидкість передачі до показника $V_C = 68,4$ Мбіт/с, щоб досягти показника продуктивності $R = 138,37$ Мбіт/с и виконувати передачу інформації з максимальною інформаційною ефективністю відносно цих параметрів. При цьому, в запасі залишиться ще деякий частотний ресурс $V_C = 1,6$ Мбіт/с. Графічно приклад наведено на рисунку 4.10.

Як бачимо раціональний вибір типу модуляції та параметрів надлишкового кодування має значний вплив на кількість витраченого ресурсу для досягнення екстремуму продуктивності.

4.5 Опис методики забезпечення заданої достовірності на основі вибору параметрів блоку коду та типу модуляції за умови сталої продуктивності джерела повідомлень при зміні частотної смуги передачі

У даному дослідженні були представлені універсальні інструменти для забезпечення заданої достовірності передачі інформації (2.1-2.12). Вони були представлені саме у порядку визначення параметрів системи передачі. Але вимоги щодо забезпечення бітової ймовірності помилки на рівні $P_6 = 10^{-6}$ з одночасною підтримкою сталості продуктивності джерела вимагають дещо інакшого використання представлених інструментів.

По-перше, визначення показнику продуктивності при недостовірній передачі (без кодування) не потребує використовувати усі представлені інструменти, а лише деякі. В деякому сенсі, можна одразу дізнатися яку продуктивність необхідно буде підтримувати.

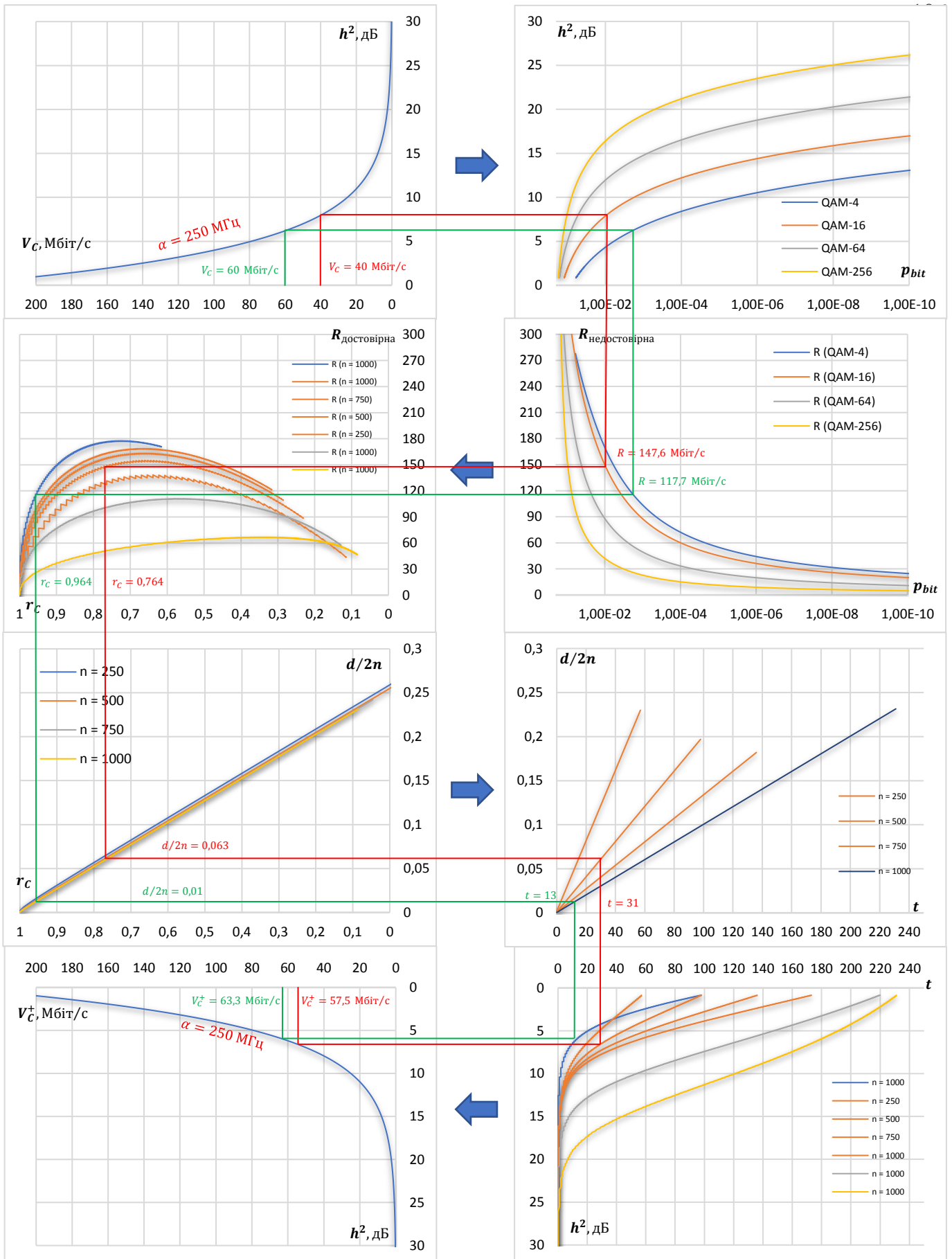


Рисунок 4.11 – Методика підтримання сталої продуктивності джерела

По-друге, знаючи продуктивність без кодування яку необхідно підтримувати можна виконати розрахунки параметрів системи та використати інструменти в зворотному напрямку.

При такому використанні дана методика буде визначати продуктивність при недостовірній передачі (без кодування) та підтримувати її шляхом застосування завадостійкого кодування з розширенням спектральних характеристик джерела повідомлень.

Методика представлена комплексним графіком на рисунку 4.11, та вирішує головну проблему – визначення показника розширення частотного ресурсу при різних можливих параметрах системи передачі. Розберемо кожний крок методики окремо.

Крок 1. Спочатку визначається енергетичний показник h^2 у децибелах в залежності від каналної швидкості передачі V_C , що використовується. Відповідно використання більшої каналної швидкості передачі при сталому параметрі α , призводить до зменшення енергетичного ресурсу та навпаки.

Крок 2. Після визначення енергетичного ресурсу представленого показником h^2 потрібно обрати тип модуляції та визначити стартову ймовірність помилки на виході каналу зв'язку p_b . При гарному енергетичному показнику можна одразу вибрати тип модуляції який забезпечить задану достовірність передачі інформації навіть без використання кодування.

Крок 3. Наступним кроком є визначення продуктивності джерела повідомлень при недостовірній передачі (без кодування) $R_{\text{недостовірна}}$. Саме цю продуктивність потрібно буде підтримувати сталою у тому разі, коли достовірність передачі інформації не буде задовольняти поставлені вимоги (у додатку А наведені два таких приклади).

Крок 4. Знаючи продуктивність при недостовірній передачі одразу можна сказати, яка повинна бути продуктивність при достовірній передачі, оскільки вони мають бути рівними. На цьому кроці обирається довжина

блоку коду n та за проекцію визначається швидкість коду r_c який забезпечує задану достовірність при сталій продуктивності.

Крок 5. За методикою аналізу завадостійких можливостей блокових кодів, використовуючи швидкість кодування визначається нормована відстань по Хеммінгу $d/2n$, оскільки вона є сполучною ланкою з виправною здатністю коду t . Застосовується лише границя Плоткіна, завдяки тому, що показує максимальні можливості завадостійкого коду.

Крок 6. Маючи значення нормованої відстані по Хеммінгу $d/2n$ визначаємо виправну здатність коду t .

Крок 7. На цьому етапі використовується біноміальна модель генерації помилок у бінарному каналі зв'язку для відображення взаємозв'язку параметру виправної здатності коду з енергетичним показником h^2 .

Крок 8. Знаючи енергетику каналу зв'язку h^2 визначаємо каналну швидкість передачі V_c до якої потрібно розширити частотний ресурс щоб забезпечити умову сталості продуктивності джерела повідомлень.

Як бачите, за 8 кроків дана методика може визначити показник розширення спектральної характеристики джерела повідомлень та параметри завадостійкого коду який забезпечить задану достовірність передачі інформації та сталу продуктивність джерела повідомлень. Частину результату цієї методики можуть виконати апроксимаційні залежності представлені у додатку А, але після їх застосування потрібно застосувати наведені вище інструменти для визначення параметрів кодування. Методика забезпечення заданої достовірності на основі вибору параметрів блоку коду та типу модуляції за умови сталої продуктивності джерела повідомлень при зміні частотної смуги передачі дозволяє знайти усі потрібні параметри системи передачі для задоволення поставлених вимог.

Висновки до розділу 4

1. Головними умовами досягнення послуг високоякісного зв'язку за вимоги незмінності швидкості джерела повідомлень при зміні частотної смуги передачі є гарна енергетика каналу зв'язку та використання коду з якомога більшою довжиною блоку коду.

2. Результат вирішення задачі забезпечення достовірності та сталості продуктивності при зміні частотної смуги передачі базується на взаємозв'язку каналних швидкостей, опис якого був виконаний поліноміальною апроксимацією 6-го ступеня.

3. Зміна модуляції можлива лише у випадку зниження кратності модуляції, коли фіксовані параметри завадостійкого кодування дозволяють йому мати гарний запас можливостей для подальшого розширення частотного ресурсу.

4. В деяких випадках для досягнення екстремуму продуктивності джерела повідомлень варто змінити тип модуляції чи довжину блоку коду, а не витратити частотний ресурс, який є дорогим.

5. Розроблена комплексна графічна методика визначення параметрів системи передачі які задовільнять вимоги щодо достовірності передачі інформації та сталості продуктивності джерела повідомлень при недостовірній передачі.

ВИСНОВКИ

Дана робота присвячена розробці методики забезпечення заданої достовірності передачі інформації за умови сталої продуктивності джерела повідомлень у процесі розширення частотного ресурсу для надання його завадостійкому кодуванню. Результат розробки представлений у вигляді комплексного графічного зображення, що супроводжується повним покроковим описом дій, для визначення параметрів системи передачі, які забезпечують умови сталості продуктивності джерела повідомлень при зміні частотної смуги передачі.

У першому розділі описана характеристика джерела повідомлень, що називається продуктивність, яка характеризується кількістю виданої інформації за одиницю часу. Описана можливість сучасних телекомунікаційних систем забезпечувати високоякісний зв'язок на фізичному рівні з метою задоволення вимог споживачів. Проаналізовані відомі формулювання вирішення проблеми надання високоякісного зв'язку за умови сталості продуктивності джерела повідомлень при використанні додаткових ресурсів каналу зв'язку та виконана постановка завдання дослідження цієї магістерської дисертації.

У другому розділі продемонстровано вплив взаємозв'язку частотного та енергетичного ресурсів каналу зв'язку на результуючу продуктивність джерела повідомлень. Проаналізовано вплив типу модуляції та параметрів надлишкових кодів на результуючу продуктивність джерела повідомлень.

У третьому розділі виконаний аналіз проведених досліджень щодо можливостей блокового кодування при процесі розширення спектральних характеристик джерела повідомлень і проведений аналіз алгоритму управління параметрами каналу зв'язку для забезпечення поставлених вимог у роботі.

У четвертому розділі приведений аналіз умов досягнення високоякісного зв'язку при умові незмінності швидкості джерела

повідомлень з використанням додаткового частотного ресурсу. Вирішена задача забезпечення заданої достовірності передачі, але вже при умові сталості продуктивності джерела повідомлень з розширенням частотного ресурсу. За результатами вирішеної задачі проведений аналіз зміни впливу кратності модуляції на забезпечення поставлених вимог. Також проведена оцінка доцільності витрачених ресурсів при наближенні до екстремуму продуктивності джерела повідомлень. Сформований покроковий опис методики забезпечення заданої достовірності на основі вибору параметрів блоку коду та типу модуляції за умови сталої продуктивності джерела повідомлень при зміні частотної смуги передачі.

Варто відмітити, що представлені інструменти для забезпечення заданої достовірності є універсальними і зможуть визначити параметри системи передачі за будь-яких поставлених вимог щодо використаних ресурсів. Але в цьому випадку обмеженням є можливість реально телекомунікаційної системи яка використовується.

Комплексна графічна методика потребувала дещо іншого підходу до використання наданих інструментів забезпечення заданої достовірності. Зазвичай продуктивність джерела повідомлень визначається останнім параметром системи передачі, але поставлені вимоги щодо сталості продуктивності потребували останнім знаходити показник каналної швидкості передачі до якого потрібно збільшитись.

Розроблені апроксимаційні залежності дозволяють одразу знайти показник каналної швидкості для збільшення, але тоді потрібно знову застосувати інструменти для визначення усіх параметрів системи передачі. Комплексне графічне відображення одразу визначає усі необхідні параметри системи передачі.

Комплексна графічна методика є базовою для подальших досліджень у напрямку визначення параметрів системи передачі які будуть задовольняти вимоги щодо достовірності передачі інформації та підтримувати сталість продуктивності джерела повідомлень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Art of Doing Science and Engineering: Learning to Learn / Richard R. Hamming. - K.: 2003. – CRC Press – с.376.
2. Cover T. M. Elements of Information Theory, 2nd ed. [Text] / T. M. Cover, J. A. Thomas. – Wiley-Interscience, 2006. – 772 p.
3. G. Hudiakov, “Development of the evaluation capacity theory of electricity and radio systems”, Komponenti i Tekhnologii, no. 7, pp. 147–154, 2011 (in Russian).
4. G.S.V. Radha Krishna Rao, G. Radhamani. WiMAX: A Wireless Technology Revolution. — 2007, ISBN 0-8493-7059-0.
5. Gallager R. G. Information Theory and Reliable Communication [Text] / R. G. Gallager. – Wiley, 1968. – 588 p
6. Hanzo L. Quadrature Amplitude Modulation: From Basics to Adaptive Trellis-Coded, Turbo-Equalised and Space-Time Coded OFDM, CDMA and MCCDMA Systems, 3rd ed [Text] / L. Hanzo, S. X. Ng, T. Keller, and W. T. Webb. – Piscataway, NJ: IEEE Press/Wiley, – 2004. – 1036 p.
7. J.G. Proakis, Digital Communications, D.D. Klovskii, Ed. Moscow, Russia: Radio i Svyaz, 2000 (in Russian).
8. L. Uryvsky, A. Korniienko, B. Shmigel. Analysis of Telecommunication channel spectral characteristics with block coding at a constant speed of the message source // Information and Telecommunication Sciences Volume 12 Number 1 January-June 2021
9. MacWilliams F. J., Sloane N. J. A. “The Theory of Error-Correcting Codes. Parts 1, 2”, Bell Laboratories, NJ, USA. – 1977. – 744 p.
10. Moray Rumney. IMT-Advanced: 4G Wireless Takes Shape in an Olympic Year // Agilent Measurement Journal, September 2008.
11. Rec. ITU-R M.1645, Framework and overall objectives of the future development of IMT-2000 and systems beyond IMT-2000.

12. REPORT ITU-R M.2134 Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s).
13. Report ITU-R M.2135-1 (12/2009) Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced.
14. Shannon C. E. A mathematical Theory of Communication [Text] / C. E. Shannon. – The Bell System Technical Journal, vol. 27., 1948. – pp. 379–423, 623–656.
15. Uryvskiy L. Pieshkin A. The informational efficiency improving methods of the signal-code constructions with the condition of providing required reliability - Budapest, Hungary: The scientific heritage - № 11, 2017 - p.p. 72...77.
16. Uryvsky L., Pieshkin A. Assessment of Information Efficiency of Error-correcting Codes in Plotkin bound [Електронний ресурс] // IEEE Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки. – 2017.
17. Uryvsky L., Prokopenko K., Peshkin A. The convolutional codes analysis technique on the optimum block codes grounds// Information and Telecommunication Sciences. – К.: NTUU 'KPI'. – 2014. – № 2, p.8-13.
18. Березюк Н.Т., Андрущенко А.Г., Мощицкий С.С. и др. Кодирование информации (двоичные коды). / Под ред. Н.Т. Березюка. – Харьков: Вища школа, 1978. – 252 с
19. Беркман Л. Н. Багатоканальні модеми [Текст] : Монографія / Л. Н. Беркман, І. С. Щербина, О. І. Чумак, Л. В. Рудик // За наук. ред. С. Є. Захаренка. – К. : Зв'язок, 2006. – 149 с.
20. Берлин А. Н. Цифровые сотовые системы связи [Текст] / А. Н. Берлин. – М. : Эко-Трендз, 2007. – 296 с.
21. Бородин Л. Ф. Введение в теорию помехоустойчивого кодирования [Текст] / Л. Ф. Бородин. – М. : Сов. радио, 1968. – 408 с.
22. Бриллюэн Л. Наука и теория информации [Текст] / Л. Бриллюэн, пер. с англ. А. А. Харкевича. – М. : Физматгиз, 1960. – 392 с.

23. Галлагер Р. Коды с малой плотностью проверок на четность [Текст] / Р. Галлагер ; М. : «Мир», 1966. – 144 с.
24. Дмитриев В. И. Прикладная теория информации: учебник для вузов [Текст] / В. И. Дмитриев. – М. : Высшая школа, 1989. – 320 с.
25. Духин А. А. Теория информации [Текст] / А. А. Духин. – М. : Гелиос АРВ, 2007. – 248 с.
26. Жураковський Ю. П. Теорія інформації та кодування [Текст] : підручник / Ю.П. Жураковський, В.П. Полтораки. – К.: Вища шк., 2001. – 255 с
27. Зюко А. Г. Помехоустойчивость и эффективность систем связи [Текст] / А. Г. Зюко // 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Связь, 1972. – 360 с.
28. Ильченко М. Ю. Основы теории телекоммуникаций / Підручник / За заг. ред. проф. Ильченка М.Ю. – К.: 2010. – ІССЗІ НТУУ «КПІ» – с.786, іл.
29. Ильченко М. Ю. Сучасні телекомунікаційні системи [Текст] / М. Ю. Ильченко, С. О. Кравчук. – К. : Наук. думка, 2008. – 328 с.
30. Кларк Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи [Текст] / Дж. Кларк, Дж. Кейн. – М. : Радио и Связь, 1987. – 195 с.
31. Колмогоров А.Н. Интерполирование и экстраполирование стационарных последовательностей. – М.: Изв. АН СССР. Сер. Матем., 1941, №5. С. 3–14.
32. Коржик В. И. Расчет помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений [Текст]: справочник / В. И. Коржик, Л. М. Финк, К. Н. Щелкунов. – М. : Радио и связь, 1981. – 231 с.
33. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. -М.: Техносфера, 2005 – 320 с.
34. Пешкін А.М. Порівняння методик синтезу параметрів коригуючих кодів для оцінки їх завадостійких властивостей// 4-а міжнародна науково-практична конференція Фізико-технологічні проблеми

радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки 23-25 жовтня 2014 р., - Чернівці, Україна - Збірник тез, с.95-96.

35. Пешкін А.М. Формування сигнально-кодових конструкцій на основі кодів, забезпечуючих максимальне наближення до границі Шеннона [Текст] : дисертація кандидата технічних наук : 05.12.02 / А.М. Пешкін; Київ, НТУУ «КПІ». – К. : 2018. – 149 с.

36. Питерсон У. Коды, исправляющие ошибки [Текст] / У. Питерсон, Э. Уэлдон. // М. : «МИР», 1976. – 594 с.

37. Прокопенко Е. А. Повышение информационных возможностей каналов с многопозиционными сигналами в системах беспроводной связи [Текст] : дисертація кандидата технічних наук : 05.12.02 / К. А. Прокопенко; Киев, НТУУ «КПИ». – К. : 2011. – 175 с.

38. Рубцов А. Е. Влияние неточности оценки канала на вероятность битовых ошибок систем связи с M-QAM модуляцией [Текст] / А. Е. Рубцов, В. С. Шпагина // Труды (седьмой) научной конференции по радиофизике, 7 мая 2003. Ред. А. В. Якимов. – Нижний Новгород: ТАЛАМ, 2003. – с. 216–217.

39. Сальников И.И. Основные этапы развития информационных потребностей человека // Современные наукоемкие технологии. – 2010. – № 10. – С. 186-188.

40. Уривський Л.О., Корнієнко А.А. Методика визначення параметру швидкості кодування за алгоритмом управління ситуацією в каналі зв'язку при незмінності продуктивності джерела повідомлень. - К.: ІТС КПІ ім. Ігоря Сікорського, XV Міжнародна НТК «Перспективи телекомунікацій», /Збірник матеріалів. – 2021, с.62...65.

41. Уривський Л.О., Пешкін А.М. Методика оцінки граничної інформаційної ефективності завадостійких кодів// Information and Telecommunication Sciences, – К.: NTUU 'KPI'. – 2016. – № 2. – p.70-74.

42. Уривський Л.О., Прокопенко К.А. Визначення границь коригувальних властивостей блокових кодів // Збірник наукових праць – Львів, «Львівська політехніка», 2011, №705, с. 98 – 104.
43. Урывский Л. А. Основы прикладной теории информации для телекоммуникаций [Текст] : диссертация доктора технических наук : 05.12.02 / Л. А. Урывский; Киев, НТУУ «КПИ». – К. : 2009. – 377 с.
44. Урывский Л. А., Прокопенко Е. А., Пешкин А. М. Выбор блочного помехоустойчивого кода по критерию максимального приближения к границе Шеннона // Telecommunication Sciences. – К.: NTUU 'KPI'. – 2011. – № 1. – С. 41-47.
45. Урывский Л.А., Пешкин А.М. Исправляющая способность блочных помехоустойчивых кодов в пределах аксиоматики Шеннона// 2-а міжнародна конференція молодих вчених «Інфокомунікації — сучасність та майбутнє». Збірка тез, ч.1. – Одеса: ОНАЗ, – 2012 – с. 33...36.
46. Урывский Л.А., Пешкин А.М. Оценка энергетических границ использования каскадных кодов – Budapest, Hungary: The scientific heritage - № 8, 2017, p. 91-97.
47. Финк Л. М. Теория передачи дискретных сообщений [Текст] / Л. М. Финк ; М. : «Советское радио», 1970. – 728 с.
48. Хинчин А. Работы по математической теории массового обслуживания. – М.: Физмат, 1963. – 236с.
49. Хинчин А.Я. Об основных теоремах теории информации. Успехи мат. наук, 1956, №1.
50. Хинчин А.Я. Понятия энтропии в теории вероятностей. Успехи мат. наук, 1953, №3.
51. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике / Пер. с англ. под ред. Н.А. Железнова. – М.: ИЛ, 1963. – 829с.
52. Uryvsky L., Korniienko A., Shmigel B. Analysis of Telecommunication Channel Spectral Characteristics with Block Coding at a

Constant Speed of the Message Source / Information & Telecommunication Sciences. – K.: Igor Sikorsky KPI, № 1, 2021. – p.p. 55-61.

<http://infotelesc.kpi.ua/issue/view/14116>

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Коефіцієнти рівняння поліноміальної апроксимації
($\alpha = 250 [\mu\text{s}]^{-1}$)

КАМ – 4							
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
$n = 250$	8,8584213486 $\cdot 10^{-9}$	- 1,8317036833 $\cdot 10^{-6}$	1,4434175275 $\cdot 10^{-4}$	- 5,3139280439 $\cdot 10^{-3}$	9,3056406948 $\cdot 10^{-2}$	0,3367109677	1,1843407993
$n = 500$	4,7896511404 $\cdot 10^{-9}$	- 1,1338084017 $\cdot 10^{-6}$	1,0232688244 $\cdot 10^{-4}$	- 4,3140842585 $\cdot 10^{-3}$	8,5973192221 $\cdot 10^{-2}$	0,3085507773	1,3796600672
$n = 750$	3,5370002884 $\cdot 10^{-9}$	- 8,8737639242 $\cdot 10^{-7}$	8,4865766923 $\cdot 10^{-5}$	- 3,7894224045 $\cdot 10^{-3}$	7,9772618589 $\cdot 10^{-2}$	0,32417690299	1,4163370347
$n = 1000$	2,9869400453 $\cdot 10^{-9}$	- 7,7787874772 $\cdot 10^{-7}$	7,7226519553 $\cdot 10^{-5}$	- 3,5800234604 $\cdot 10^{-3}$	7,8144152637 $\cdot 10^{-2}$	0,3142856152	1,4858046263
КАМ – 16							
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
$n = 250$	4,7148332115 $\cdot 10^{-7}$	- 4,5381457494 $\cdot 10^{-5}$	1,6671079246 $\cdot 10^{-3}$	- 2,861662395 $\cdot 10^{-2}$	0,2337057945	0,22739544144	0,6349200636
$n = 500$	2,6083435019 $\cdot 10^{-7}$	- 2,9446598159 $\cdot 10^{-5}$	1,2672130797 $\cdot 10^{-3}$	- 2,5473886566 $\cdot 10^{-2}$	0,2420563574	0,0731675522	0,8752925253
$n = 750$	1,9644602983 $\cdot 10^{-7}$	- 2,3844220363 $\cdot 10^{-5}$	1,1024933644 $\cdot 10^{-3}$	- 2,3797441298 $\cdot 10^{-2}$	0,2419122960	0,0143742415	0,9851925475
$n = 1000$	1,5359569495 $\cdot 10^{-7}$	- 1,9427963709 $\cdot 10^{-5}$	9,3602099271 $\cdot 10^{-4}$	- 2,1032617745 $\cdot 10^{-2}$	0,2222085234	0,0600582498	0,9745657676
КАМ – 64							
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
$n = 250$	3,7474023992 $\cdot 10^{-5}$	- 1,4913476175 $\cdot 10^{-3}$	2,2694069254 $\cdot 10^{-2}$	- 0,1612197731	0,5469634901	0,2502432701	0,2531712628
$n = 500$	2,9384329605 $\cdot 10^{-5}$	- 1,4643081747 $\cdot 10^{-3}$	2,7722109916 $\cdot 10^{-2}$	- 0,2447797933	1,0159872025	- 0,6856840244	0,6825093176
$n = 750$	1,6893317370 $\cdot 10^{-5}$	- 9,1664673573 $\cdot 10^{-4}$	1,8925693097 $\cdot 10^{-2}$	- 0,1822140189	0,8249556879	- 0,4922555635	0,6571421368
$n = 1000$	1,2729673914 $\cdot 10^{-5}$	- 7,2974917731 $\cdot 10^{-4}$	1,5915347329 $\cdot 10^{-2}$	- 0,1617211417	0,7720748397	- 0,4745218138	0,6852179399

Продовження таблиці А.1

КАМ – 256							
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
n = 250	4,85335145896 $\cdot 10^{-3}$	- 7,60621845699 $\cdot 10^{-2}$	0,4552762497569	- 1,2731387514	1,7185938659	3,7941949018 $\cdot 10^{-2}$	0,1425433776
n = 500	4,0288804414 $\cdot 10^{-3}$	- 8,7139126753 $\cdot 10^{-2}$	0,7165072321	- 2,7580641658	5,0179523913	- 2,7107508354	0,7057075238
n = 750	2,3053789769 $\cdot 10^{-3}$	- 5,7808313643 $\cdot 10^{-2}$	0,5510153101	- 2,4560174478	5,1594570743	- 3,3835792403	0,9466321354
n = 1000	1,7839861918 $\cdot 10^{-3}$	- 5,0015193503 $\cdot 10^{-2}$	0,5328298252	- 2,6544894137	6,2230085055	- 4,8907636783	1,4073057545