

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет програмування та комп'ютерних і телекомунікаційних систем

Кафедра автоматизацій, комп'ютерно-інтегрованих технологій і телекомунікацій

## ДИПЛОМНА РОБОТА

Другий ( Магістерський)

Освітній рівень

Галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації

Шифр і назва спеціальності

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Шифр і назва спеціальності

на тему Моделювання таймерних сигнальних конструкцій як інструментарій збільшення пропускної здатності каналу зв'язку в умовах дії завад при заданій якості прийому інформації

ДРТР. 2019083.14.05.ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група ТР<sub>м</sub>-19-1

  
підпис

Т.Л. Гончарук  
Ініціали, прізвище

Керівник: к.в.н. доцент

  
підпис

В.І. Дужанський  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри: д-р техн. наук, проф.

  
підпис

В.В. Мартинок  
Ініціали, прізвище

11 12 2020 р.

Хмельницький, 2020

Хмельницький національний університет

Факультет програмування та комп'ютерних і телекомунікаційних систем  
Кафедра автоматизацій, комп'ютерно-інтегрованих технологій і  
телекомунікацій

Освітній рівень другий (магістерський)

Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації

Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка

Освітня-професійна програма Телекомунікації та радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою проф.

Мартинюк В.В.

« 1 » 09 2020р.



## ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Гончаруку Тарасу Леонідовичу

1 Тема роботи: Моделювання таймерних сигнальних конструкцій як інструментарій збільшення пропускної здатності каналу зв'язку в умовах дії завад при заданій якості прийому інформації

керівник роботи Лужанський Віктор Ігорович, к.в.н, доцент.

Затверджено наказом по університету від «1» вересня 2020р. № 118.

2 Строк подання студентом роботи на кафедру: 05.12.2020р.

3 Вихідні дані (характеристика об'єкта, умов дослідження та ін.)

Мета роботи: Оцінка ефективності використання таймерних сигнальних конструкцій для збільшення пропускної здатності каналу зв'язку в умовах дії флуктуаційних завад при заданій ймовірності помилкового прийому інформації.

Об'єкт дослідження: процеси перетворення та кодування сигналів, що забезпечують завадозахищеність радіотехнічних та телекомунікаційних систем.

Предмет дослідження: пропускна здатність каналу зв'язку в умовах дії флуктуаційних завад при використанні таймерних сигнальних конструкцій.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

1) характеристика блокових кодів та таймерних сигнальних конструкцій;

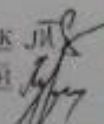
2) пропускна здатність каналу при таймерних сигнальних конструкціях;

3) підвищення інформаційної смистовості, ентропії повідомлень та ймовірність помилки в M-іттих системах фазової модуляції;

4) ефективність таймерних сигнальних конструкцій при роботі в реальних каналах зв'язку.

Завдання отримав Т.Л. Гончарук

Науковий керівник В.І. Лужанський



## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів (розділів) дипломної роботи	Строк виконання етапів дипломної роботи	Примітка
1	Вибір та аналіз вітчизняної та зарубіжних наукових літератур для написання наукової роботи на дипломній роботі	до 15.05.2020	Виконано
2	Написання та оформлення наукової статті до видання	до 01.08.2020	Виконано
3	Розділ 1. Загальні принципи будівництва та проектування систем каналів	до 20.08.2020	Виконано
4	Розділ 2. Проектування будівництва каналу зростаючої ширини	до 10.10.2020	Виконано
5	Розділ 3. Підприємство інженерних систем, проектування на імовірнісне навантаження в М-інженерній системі розробки моделювання	до 01.11.2020	Виконано
6	Розділ 4. Експлуатація роботи каналів інженерних систем будівництва в реальних умовах зв'язку	до 01.12.2020	Виконано
7	Подання дипломної роботи на аттестацію	до 05.12.2020	Виконано
8	Подання дипломної роботи до захисту	до 07.12.2020	Виконано

Студент



Т.Л. Гончарук

Ім'я, прізвище

Керівник роботи



В.І. Лужанський

Ім'я, прізвище

## ЗМІСТ

Перелік скорочень .....	6
Вступ.....	7
1 ХАРАКТЕРИСТИКА БЛОКОВИХ КОДІВ ТА ТАЙМЕРНИХ СИГНАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	10
1.1 Основні характеристики та властивості блокових кодів .....	10
1.2 Статистичні параметри каналів моделі Гільберта .....	12
1.3 Таймерні сигнальні конструкції як інструментарій укрупнення сигналів при блоковому кодуванні .....	14
Висновки до першого розділу.....	16
2 ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ КАНАЛУ ПРИ ТАЙМЕРНИХ СИГНАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЯХ.....	17
2.1 Обчислення числа реалізацій в таймерних сигнальних конструкціях ..	17
2.2 Обчислення пропускнуої здатності каналу при таймерних сигнальних конструкціях .....	20
Висновки до другого розділу.....	26
3 ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ЄМНОСТІ, ЕНТРОПІЇ ПОВІДОМЛЕНЬ ТА ІМОВІРНІСТЬ ПОМИЛКИ В М-ІТТИХ СИСТЕМАХ ФАЗОВОЇ МОДУЛЯЦІЇ.....	27
3.1 Імовірність помилки в М-іттих системах фазової модуляції .....	27
3.2 Збільшення інформаційної ємності та ентропії кодового слова за постійної тривалості.....	35
Висновки до третього розділу.....	46
4 ЕФЕКТИВНІСТЬ ТСК В КАНАЛАХ ЗВ'ЯЗКУ .....	48
4.1 Ефективність наднайквістової швидкості модуляції .....	48
4.2 Ефективність ТСК для перетворення якості у швидкість передачі.....	56
Висновки до четвертого розділу.....	58
Висновки .....	60
Перелік посилання .....	63

Додаток А Таблиці Q-функції.....	68
Додаток Б Значення інтегралу імовірності.....	71
Додаток В Стаття у фаховому журналі.....	77
Додаток Г Презентація.....	85

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ТСК – таймерна сигнальна конструкція;

СПДП – системах передачі дискретних повідомлень;

КК – кодова комбінація;

ЦК – циклічні коди;

КПВ – код з постійною вагою;

КС – кодове слово;

МДК – мажоритарно декодовані коди;

ЗММ – значущий момент модуляції.

## **ВСТУП**

Таймерні сигнальні конструкції відіграють важливу роль у передачі значних цифрових потоків інформації з використанням великої кількості реалізацій ТСК.

Передача дискретної інформації за допомогою багатопозиційних часових кодів забезпечує задану якість зв'язку в умовах дії флукуаційних завад.

### **Актуальність теми.**

Використання таймерних сигнальних конструкцій дозволяє підвищити пропускну здатність каналу зв'язку, підвищити інформаційну ємність та ентропію кодового слова за постійної тривалості кодових комбінацій, зменшити імовірність помилкового прийому інформації в умовах дії флукуаційних завад.

Таким чином, науково-технічна задача, яка розв'язується в дипломній роботі, є актуальною.

### **Мета дипломної роботи.**

Оцінка ефективності використання таймерних сигнальних конструкцій для збільшення пропускну здатності каналу зв'язку в умовах дії флукуаційних завад при заданій ймовірності помилкового прийому інформації.

### **Завдання дипломної роботи:**

- 1. Характеристика блокових кодів та таймерних сигнальних конструкцій.**
- 2. Пропускна здатність каналу при таймерних сигнальних конструкціях.**
- 3. Підвищення інформаційної ємності, ентропії повідомлень та ймовірність помилки в M-іттих системах фазової модуляції.**
- 4. Ефективність таймерних сигнальних конструкцій при роботі в реальних каналах зв'язку.**

**Об'єктом дослідження є процеси перетворення та кодування сигналів,**

що забезпечують завадозахищеність радіотехнічних та телекомунікаційних систем.

**Предметом дослідження** є пропускна здатність каналу зв'язку в умовах дії флуктуаційних завад при використанні таймерних сигнальних конструкцій.

#### **Методи досліджень.**

При вирішенні поставлених наукових завдань у дипломній роботі використовувалися: методи статистичної теорії зв'язку та теорії інформації, методи спектрального аналізу.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

Проведено моделювання таймерних сигнальних конструкцій з метою визначення пропускної здатності каналу зв'язку в умовах дії завад.

Отримав подальший розвиток удосконалений метод оцінки пропускної здатності каналу зв'язку, інформаційної ємності та ентропії кодового слова.

При моделюванні таймерних сигнальних конструкцій досягнуто підвищення ефективності пропускної здатності каналу зв'язку на 8,22% в умовах дії флуктуаційних завад при вказаній імовірності бітових помилок для забезпечення заданої якості зв'язку.

#### **Практична значимість одержаних результатів:**

Удосконалений метод оцінки пропускної здатності каналу зв'язку, інформаційної ємності та ентропії кодового слова надає змогу використовувати його в радіотехнічних та телекомунікаційних системах на основі таймерних сигнальних конструкцій для підвищення показників завадостійкості.

**Апробація результатів дослідження:** результати досліджень представлені у вигляді статті у фаховому журналі «Вісник Хмельницького національного університету» №5 2020р.

У вступі обгрунтовано актуальність наукової задачі, сформульовано мету та задачі досліджень, відображено основні наукові результати та їх практичне значення.

У першому розділі дипломної роботи наведені основні характеристики блокових кодів та таймерних сигнальних конструкцій.

У другому розділі проведено обчислення числа реалізацій та значення пропускної здатності каналу зв'язку при таймерних сигнальних конструкціях.

В третьому розділі проаналізовано імовірність помилки в M-іттих системах фазової модуляції та проведено дослідження збільшення інформаційної ємності та ентропії кодового слова за постійної тривалості.

В четвертому розділі розглянуто ефективність наднайквістової швидкості модуляції. Розраховано ефективність використання ТСК для трансформації якості у швидкість передавання.

# 1 ХАРАКТЕРИСТИКА БЛОКОВИХ КОДІВ ТА ТАЙМЕРНИХ СИГНАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

## 1.1 Основні характеристики та властивості блокових кодів

На сьогодні відома значна кількість кодів, коригуючих помилки.

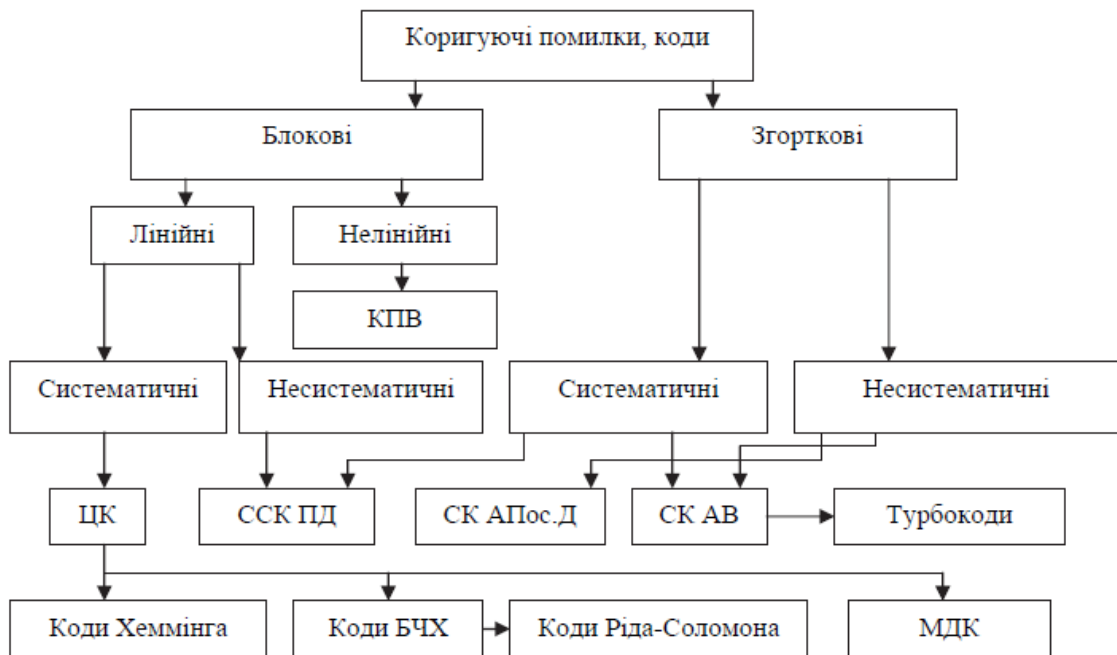


Рисунок 1.1 – Класифікація основних завадостійких кодів

Двійкові коригуючі коди можна поділити на *блокові* та *згорткові*.

До блокових відносяться такі коди, в яких кодування і декодування здійснюються в межах блока, що складається з певного числа кодових символів.

Блокові коди, в свою чергу, поділяються на лінійні та нелінійні.

Для блокових кодів прийнято позначення  $(n, m)$ . До лінійних  $(n, m)$  кодів належать такі, в яких  $r = n - m$  надлишкових символів формуються із  $m$  інформаційних за допомогою лінійних операцій. Коригуюча здатність двійкових кодів залежить від мінімальної кодової відстані за Хеммінгом:

$$d_0 = \min \sum_{i=1}^n (A_{ji} + A_{li}) \bmod 2, \quad (1.1)$$

де  $A_{ji}, A_{li}$  - порівняльні КС;  $j, l = 1, 2, 3, \dots, 2^k, j \neq l$ .

Мінімальна кодова відстань дорівнює найменшій із усіх можливих відстаней в метриці Хеммінга між усіма можливими парами КС. Для лінійних кодів, з урахуванням того, що в коді завжди є нульове КС, кодова відстань визначається мінімальною вагою  $W(t)$  кодових слів, тобто [1]:

$$d_0 = \min W(t). \quad (1.2)$$

Вага КС дорівнює арифметичній сумі числа одиниць серед інформаційних та перевірочних кодових символів  $n$ -значного кодового слова (КС), тобто:

$$Wt(A_j) = \sum_{i=1}^m a_i + \sum_{i=1}^r b_i. \quad (1.3)$$

Максимальна кратність виявлення помилок або виправлення помилок пов'язані з кодовою відстанню наступними виразами:

- в режимі виявлення помилок:

$$t_B = d_0 - 1; \quad (1.4)$$

- в режимі виправлення помилок:

$$t_{BII} = \lfloor (d_0 - 1) / 2 \rfloor. \quad (1.5)$$

Як раніше зазначалося, побудова коригуючого коду полягає у формуванні надлишкових (перевірочних) символів  $b_1, b_2, \dots, b_r$  за відомими інформаційними символами  $a_1, a_2, \dots, a_m$ .

Добуток матриці-рядка, який містить  $m$  елементів, на прямокутну матрицю розмірності  $n \times m$  є матриця-рядок, що складається з  $n$  елементів.

## 1.2 Статистичні параметри каналів моделі Гільберта

Матриця перехідних ймовірностей :

$$P = \begin{bmatrix} P_{XX} & P_{XP} \\ P_{PX} & P_{PP} \end{bmatrix}. \quad (1.6)$$

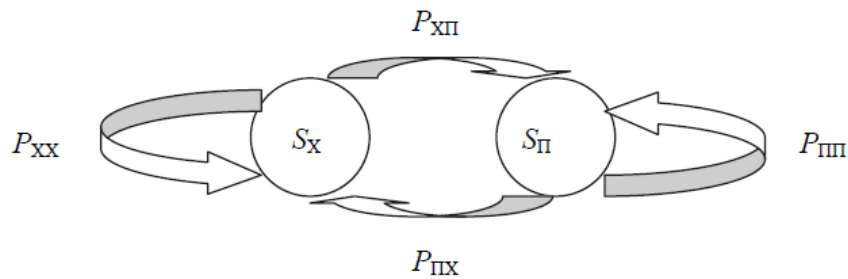


Рисунок 1.2 – Граф станів моделі Гільберта

Середня ймовірність помилкового прийому елемента:

$$\bar{p}_n = p_n \cdot P_{PP} = p_n \cdot \frac{P_{XP}}{P_{PX} + P_{XP}}. \quad (1.7)$$

Коефіцієнт групування:

$$\alpha = 1 - P_{XP} - P_{PX}. \quad (1.8)$$

Пакетом помилок вважається ділянка потоку, що починається і закінчується помилковим елементом, усередині якого відстань між помилками не перевищує деякої величини  $\hat{k}$ . У випадку каналу Гільберта поганий стан може починатися і закінчуватися правильно прийнятими елементами, а у деяких випадках може взагалі не містити помилок. Якщо П-стан розглядати як пакет, то можливе штучне заниження величини, що, у свою чергу, призводить до спотворень оцінок усіх інших параметрів моделі. Для виключення даної методичної похибки необхідно збільшувати довжину кожного пакету на деяку величину  $\rho$  або зменшувати довжину X-стану [2].

Розглянемо більш детально можливі рішення задачі обчислення ймовірності появи помилок  $m$  у прийнятому блоці довжиною  $n$  елементів для дискретного каналу, що описується моделлю Гільберта. У відповідності з моделлю Гільберта помилки можуть виникати тільки у «поганому» стані каналу, тому перед обчисленням  $P(m, n)$  необхідно визначити ймовірності  $B(i, n)$  того, що з  $n$  елементів блока  $i$  елементів були передані у «поганому» стані каналу. При цьому всі ймовірності  $B(i, n)$  для  $i = 0 \dots n$  будуть несумісними і складати повну групу подій. Це твердження дозволяє зробити перевірку правильності розрахунків, виходячи з необхідності дотримання умови  $\sum_{i=0}^n B(i, n) = 1$ , а також отримати інтегральну оцінку похибок при використанні спрощених алгоритмів обчислень [2].

Після обчислення ймовірностей  $B(i, n)$  ймовірність  $m$ -кратної помилки у блоці з  $n$  елементів можна визначити, використовуючи формулу [2]:

$$p(m, n) = \sum_{i=0}^n B(i, n) p(m | i), \quad (1.9)$$

де  $p(m|i) = C_i^m p_n^m (1 - p_n)^{i-m}$  - ймовірність  $m$ -кратної помилки, якщо число елементів у П-стані дорівнює  $i$ ;  $p_n$  - ймовірність помилки у П-стані;

$$C_i^m = \frac{i!}{m!(i-m)!} - \text{число сполучень з } i \text{ по } m.$$

Основну складність при розв'язанні задачі визначення  $P(m, n)$  становить знаходження ймовірностей  $B(i, n)$ , що відрізняються точністю отримання результату і витратами обчислювальних ресурсів. При передаванні блока довжиною  $n$  елементів можлива багаторазова зміна станів каналу. Введемо поняття вектора стану каналу як масиву з  $n$  двійкових чисел, в якому нуль відповідає передачі поточного елемента у «поганому» стані каналу. При фіксованій величині  $i$  кількість відповідних векторів стану каналу визначається як число сполучень із  $n$  по  $i$ . На відміну від каналу з незалежними помилками у даному випадку кожен вектор буде характеризуватися своєю ймовірністю. Таким чином, шукана величина  $B(i, n)$  являє собою суму ймовірностей усіх векторів стану каналу, довжиною  $n$  і вагою  $i$  [2].

### **1.3 Таймерні сигнальні конструкції як інструментарій укрупнення сигналів при блоковому кодуванні**

Багаточисленні роботи другої половини ХХ століття були направлені на вирішення наступних проблем позиційного блокового кодування:

- синтезу кодів з високими коригуючими властивостями;
- синтезу алгоритмів декодування при незначній складності;
- узгодження структури кодів, що корегують помилки.

Американський вчений Д. Слеп'ян одержав суттєві результати в розробці строгої теорії лінійних блокових кодів використовуючи математичну теорію груп.

Статистична обробка результатів вимірювань дозволила визначити основні закономірності розподілу відстаней між помилковими кодовими словами [2]:

- закон відстаней логарифмічно-нормальний;
- імовірність появи суміжних спотворених кодових слів (по два слова) –  $(2...3) \cdot 10^{-5}$ ;
- імовірність суміжних спотворених кодових слів (три слова) –  $10^{-5}$ .

Середнє значення логарифмів інтервалів в значеннях  $\Delta$  між спотвореними кодовими словами  $M(\ln l) = 10,89$ . Середньоквадратичне відхилення  $\delta(\ln(l)) = 0,33202$ .

Для оцінки параметрів каналу в хорошому стані був проведений експеримент, що полягав в оцінці якості передачі таймерних структур з постійним числом значущих моментів модуляції (ЗММ).

Довжини сигналів між ЗММ складали:

$$\tau_i = t_0 + i\Delta; \quad i \in 0 \div z, \quad 0 < z - \text{ціле число} \quad t_0 = \frac{1}{2\Delta F}; \quad \Delta = \frac{t_0}{7}. \quad (1.10)$$

Одержані результати експерименту свідчать, що імовірність появи спотвореного кодового слова із зміною числа ЗМВ знаходиться в межах  $(1,4...1,6) \cdot 10^{-3}$ .

Користуючись межею Варшамова – Гільберта визначені границі оцінки числа додаткових елементів симплексних корегуючих кодів для  $d \in (1...21)$  та  $m \in (1...60)$ , забезпечуючих відповідну ймовірність помилкового (вірного) приймання в «хорошому» стані каналу. Слід зауважити, що значний результат в підвищенні ефективності коригуючих позиційних кодів дає узгодження параметрів кодів з параметрами завод.

Незважаючи на успіхи в теорії синтезу коригуючих блокових позиційних кодів слід відмітити що підвищити їх ефективність можливо тільки при елементності не менше  $n \geq 100 \div 500$  при кодовій швидкості

$$R_k \geq 0,5.$$

Передача з двократним повторенням таймерних кодових структур, в яких відстані між ЗММ задовольняють наступній умові:

$$A_1x_1 + A_2x_2 + A_3x_3 = 0(\text{mod } A_0), \quad (1.11)$$

Таким чином при повторенні через 4 кодових слова одної й той самої сигнальної конструкції можна зменшити ймовірність помилкового прийому знака значно більше ніж чотири порядки.

Виправлення помилок зміщення одного ЗММ на величину  $0,5\Delta \leq \theta \leq 1,5\Delta$  підвищує ймовірність безпомилкового прийому на інтервалі «хорошого» стану каналу майже на три порядки. Досягнути це можливо шляхом вибору коефіцієнтів рівняння якості, що забезпечують надлишковість, та таке векторне поле, в якому зміщення одного ЗММ не приводять до невиявленої помилки через різні синдроми.

### **Висновки до першого розділу**

1. Була проведена оцінка характеристик блокових кодів та проблемам синтезу корегуючих помилки цих кодів.
2. Розглянуто формування і роботу таймерних сигнальних конструкцій та модель Гільберта.
3. Досліджені переваги таймерних сигнальних конструкцій у порівнянні з блоковими кодами.

## 2 ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ КАНАЛУ ПРИ ТАЙМЕРНИХ СИГНАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЯХ

### 2.1 Обчислення числа реалізацій в таймерних сигнальних конструкціях

Потужність реалізованого ансамблю  $N_{PT}$  на інтервалі  $T_{CK} = m \cdot t_0$  визначається наступним виразом [1]:

$$N_{PT} = \frac{(ms - i(s - 1))!}{i!(ms - is)!}, \quad (2.1)$$

де  $i$  – число заданих відрізків сигналу;

$\Delta$  – частина елемента  $t_0$  ( $\Delta = t_0/s$ ),  $s \in (2; 3; \dots; s_0)$  – цілі числа, яка забезпечує розпізнавальну здатність тривалостей окремих відрізків із заданою ймовірністю помилки на виході каналу зв'язку.

Наприклад, для  $m=7$  і  $s=6$  при синтезі сигнальної конструкції з п'яти інформаційних відрізків ( $i=5$ ):

$$N_{PT} = \frac{17!}{5!12!} = 6188.$$

У таблицях 2.1 ÷ 2.8 наведено число реалізацій ТСК, які розраховані при різних значеннях  $m$  ( $m \in 2 \div 15$ ) для  $i=1 \div 8$ ;  $s \in 2 \div 20$ .

Із таблиць 2.1 ÷ 2.8 випливає:

- 1) число реалізацій ТСК  $N_{PT}$  при зростанні параметрів  $m$  і  $s$ ;
- 2) коли  $i=m$  можлива тільки одна реалізація ( $N_{PT} = 1$ );
- 3) при  $i < m$  число реалізацій  $N_{PT} = 0$ .

Таблиця 2.1 - Число реалізацій ТСК при  $m \in 2 \div 15$  для  $i=1$   $s \in 2 \div 20$ 

$i$	$s$	$m$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		$2^m$	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384	32768
1	2	$N_{PT}$	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29
	3	$N_{PT}$	4	7	10	13	16	19	22	25	28	31	34	37	40	43
	4	$N_{PT}$	5	9	13	17	21	25	29	33	37	41	45	49	53	57
	5	$N_{PT}$	6	11	16	21	26	31	36	41	46	51	56	61	66	71
	6	$N_{PT}$	7	13	19	25	31	37	43	49	55	61	67	73	79	85
	7	$N_{PT}$	8	15	22	29	36	43	50	57	64	71	78	85	92	99
	8	$N_{PT}$	9	17	25	33	41	49	57	65	73	81	89	97	105	113
	9	$N_{PT}$	10	19	28	37	46	55	64	73	82	91	100	109	118	127
	10	$N_{PT}$	11	21	31	41	51	61	71	81	91	101	111	121	131	141
	11	$N_{PT}$	12	23	34	45	56	67	78	89	100	111	122	133	144	155
	12	$N_{PT}$	13	25	37	49	61	73	85	97	109	121	133	145	157	169
	13	$N_{PT}$	14	27	40	53	66	79	92	105	118	131	144	157	170	183
	14	$N_{PT}$	15	29	43	57	71	85	99	113	127	141	155	169	183	197
	15	$N_{PT}$	16	31	46	61	76	91	106	121	136	151	166	181	196	211
	16	$N_{PT}$	17	33	49	65	81	97	113	129	145	161	177	193	209	225
	17	$N_{PT}$	18	35	52	69	86	103	120	137	154	171	188	205	222	239
	18	$N_{PT}$	19	37	55	73	91	109	127	145	163	181	199	217	235	253
	19	$N_{PT}$	20	39	58	77	96	115	134	153	172	191	210	229	248	267
	20	$N_{PT}$	21	41	61	81	101	121	141	161	181	201	221	241	261	281

Таблиця 2.2 Число реалізацій ТСК при  $m \in 2 \div 15$  для  $i=2$   $s \in 2 \div 20$ 

$i$	$s$	$m$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		$2^m$	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384	32768
2	2	$N_{PT}$	1	6	15	28	45	66	91	120	153	190	231	276	325	378
	3	$N_{PT}$	1	10	28	55	91	136	190	253	325	406	496	595	703	820
	4	$N_{PT}$	1	15	45	91	153	231	325	435	561	703	861	1035	1225	1431
	5	$N_{PT}$	1	21	66	136	231	351	496	666	861	1081	1326	1596	1891	2211
	6	$N_{PT}$	1	28	91	190	325	496	703	946	1225	1540	1891	2278	2701	3160
	7	$N_{PT}$	1	36	120	253	435	666	946	1275	1653	2080	2556	3081	3655	4278
	8	$N_{PT}$	1	45	153	325	561	861	1225	1653	2145	2701	3321	4005	4753	5565
	9	$N_{PT}$	1	55	190	406	703	1081	1540	2080	2701	3403	4186	5050	5995	7021
	10	$N_{PT}$	1	66	231	496	861	1326	1891	2556	3321	4186	5151	6216	7381	8646
	11	$N_{PT}$	1	78	276	595	1035	1596	2278	3081	4005	5050	6216	7503	8911	10440
	12	$N_{PT}$	1	91	325	703	1225	1891	2701	3655	4753	5995	7381	8911	10585	12403
	13	$N_{PT}$	1	105	378	820	1431	2211	3160	4278	5565	7021	8646	10440	12403	14553
	14	$N_{PT}$	1	120	435	946	1653	2556	3655	4950	6441	8128	10011	12090	14365	16868
	15	$N_{PT}$	1	136	496	1081	1891	2926	4186	5671	7381	9316	11476	13861	16700	19230
	16	$N_{PT}$	1	153	561	1225	2145	3321	4753	6441	8385	10585	13041	15732	18865	21991
	17	$N_{PT}$	1	171	630	1378	2415	3741	5356	7260	9453	11935	14669	17832	21212	24801
	18	$N_{PT}$	1	190	703	1540	2701	4186	5995	8128	10585	13366	16700	19898	23700	27876
	19	$N_{PT}$	1	210	780	1711	3003	4656	6670	9045	11781	14800	18336	22123	26394	30861
	20	$N_{PT}$	1	231	861	1891	3321	5151	7381	10011	13041	16471	20304	24561	29187	34203

Таблиця 2.3 - Число реалізацій ТСК при  $m \in 2 \div 15$  для  $i=3$   $s \in 2 \div 20$ 

$i$	$s$	$m$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		$2^m$	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384	32768
3	2	$N_{PT}$	0	1	10	35	84	165	286	455	680	969	1330	1771	2300	2925
	3	$N_{PT}$	0	1	20	84	220	455	816	1330	2024	2925	4060	5456	7140	9139
	4	$N_{PT}$	0	1	35	165	455	969	1771	2925	4495	6545	9139	12341	16215	20825
	5	$N_{PT}$	0	1	56	286	816	1771	3276	5456	8436	12341	17296	23426	30856	39711
	6	$N_{PT}$	0	1	84	455	1330	2925	5456	9139	14190	20825	29260	39711	52394	67525
	7	$N_{PT}$	0	1	120	680	2024	4495	8436	14190	22100	32509	45760	62196	82160	105995
	8	$N_{PT}$	0	1	165	969	2925	6545	12341	20825	32509	47905	67525	91881	121485	156849
	9	$N_{PT}$	0	1	220	1330	4060	9139	17296	29260	45760	67525	95284	129766	171700	221815
	10	$N_{PT}$	0	1	286	1771	5456	12341	23426	39711	62196	91881	129766	176851	234136	302621
	11	$N_{PT}$	0	1	364	2300	7140	16215	30856	52394	82160	121485	171700	234136	310124	400995
	12	$N_{PT}$	0	1	455	2925	9139	20825	39711	67525	105995	156849	221815	302621	400995	518665
	13	$N_{PT}$	0	1	560	3654	11480	26235	50116	85320	134044	198485	280840	383306	508080	657359
	14	$N_{PT}$	0	1	680	4495	14190	32509	62196	105995	166650	246905	349504	477191	632710	820105
	15	$N_{PT}$	0	1	816	5456	17296	39711	76076	129766	204156	302621	428536	585276	776216	1003316
	16	$N_{PT}$	0	1	969	6545	20825	47905	91881	156849	246905	366145	518665	708561	934343	1212546
	17	$N_{PT}$	0	1	1140	7770	24804	57155	109736	187460	295240	437989	620620	847107	1128205	1464646
	18	$N_{PT}$	0	1	1330	9139	29260	67525	129766	221815	349504	518665	735130	1003316	1329966	1733333
	19	$N_{PT}$	0	1	1540	10660	34220	79079	152096	260130	410040	608685	862903	1179407	1564153	2029478
	20	$N_{PT}$	0	1	1771	12341	39711	91881	176851	302621	477191	708561	1003316	1374788	1827485	2358722

Таблиця 2.4 - Число реалізацій ТСК при  $m \in 2 \div 15$  для  $i=4$   $s \in 2 \div 20$

$i$	$s$	$m$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		$2^m$	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384	32768
4	2	$N_{PT}$	0	0	1	15	70	210	495	1001	1820	3060	4845	7315	10626	14950
	3	$N_{PT}$	0	0	1	35	210	715	1820	3876	7315	12650	20475	31465	46376	66045
	4	$N_{PT}$	0	0	1	70	495	1820	4845	10626	20475	35960	58905	91390	135751	194580
	5	$N_{PT}$	0	0	1	126	1001	3876	10626	23751	46376	82251	135751	211876	316251	455126
	6	$N_{PT}$	0	0	1	210	1820	7315	20475	46376	91390	163185	270725	424270	635376	916895
	7	$N_{PT}$	0	0	1	330	3060	12650	35960	82251	163185	292825	487635	766480	1150626	1663740
	8	$N_{PT}$	0	0	1	495	4845	20475	58905	135751	270725	487635	814385	1282975	1929501	2794155
	9	$N_{PT}$	0	0	1	715	7315	31465	91390	211876	424270	766480	1282975	2024785	3049501	4421275
	10	$N_{PT}$	0	0	1	1001	10626	46376	135751	316251	635376	1150626	1929501	3049501	4598126	6672876
	11	$N_{PT}$	0	0	1	1365	14950	66045	194580	455126	916895	1663740	2794155	4421275	6672876	9691375
	12	$N_{PT}$	0	0	1	1820	20475	91390	270725	635376	1282975	2331890	3921225	6210820	9381251	13633830
	13	$N_{PT}$	0	0	1	2380	27405	123410	367290	864501	1749060	3183545	5359095	8495410	12840751	18671940
	14	$N_{PT}$	0	0	1	3060	35960	163185	487635	1150626	2331890	4249575	7160245	11358880	17178876	24992045
	15	$N_{PT}$	0	0	1	3876	46376	211876	635376	1502501	3049501	5563251	9381251	14891626	22533126	32795126
	16	$N_{PT}$	0	0	1	4845	58905	270725	814385	1929501	3921225	7160245	12082785	19190605	29051001	42297979
	17	$N_{PT}$	0	0	1	5985	73815	341055	1028790	2441626	4967690	9078630	15329615	24359335	36845730	53904428
	18	$N_{PT}$	0	0	1	7315	91390	424270	1282975	3049501	6210820	11358880	19190605	30507895	46227197	67340067
	19	$N_{PT}$	0	0	1	8855	111930	521855	1581580	3764376	7673835	14043870	23738715	37634408	57248622	83498677
	20	$N_{PT}$	0	0	1	10626	135751	635376	1929501	4598126	9381251	17178876	29051001	46227197	69796954	1,02 · 10 <sup>8</sup>

Таблиця 2.5 - Число реалізацій ТСК при  $m \in 2 \div 15$  для  $i=5$   $s \in 2 \div 20$

$i$	$s$	$m$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		$2^m$	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384	32768
5	2	$N_{PT}$	0	0	0	1	21	126	462	1287	3003	6188	11628	20349	33649	53130
	3	$N_{PT}$	0	0	0	1	56	462	2002	6188	15504	33649	65780	118755	201376	324632
	4	$N_{PT}$	0	0	0	1	126	1287	6188	20349	53130	118755	237336	435897	749398	1221759
	5	$N_{PT}$	0	0	0	1	252	3003	15504	53130	142506	324632	658008	1221759	2118760	3478761
	6	$N_{PT}$	0	0	0	1	462	6188	33649	118755	324632	749398	1533939	2869685	5006386	8259888
	7	$N_{PT}$	0	0	0	1	792	11628	65780	237336	658008	1533939	3162510	5949147	10424128	17259390
	8	$N_{PT}$	0	0	0	1	1287	20349	118755	435897	1221759	2869685	5949147	11238513	19757815	32801517
	9	$N_{PT}$	0	0	0	1	2002	33649	201376	749398	2118760	5006386	10424128	19757815	34826302	57940519
	10	$N_{PT}$	0	0	0	1	3003	53130	324632	1221759	3478761	8259888	17259390	32801517	57940519	96560646
	11	$N_{PT}$	0	0	0	1	4368	80730	501942	1906884	5461512	13019909	27285336	51971283	91962520	1,53 · 10 <sup>8</sup>
	12	$N_{PT}$	0	0	0	1	6188	118755	749398	2869685	8259888	19757815	41507642	79208745	1,4 · 10 <sup>8</sup>	2,35 · 10 <sup>8</sup>
	13	$N_{PT}$	0	0	0	1	8568	169911	1086008	4187106	12103014	29034396	61124064	1,17 · 10 <sup>8</sup>	2,07 · 10 <sup>8</sup>	3,47 · 10 <sup>8</sup>
	14	$N_{PT}$	0	0	0	1	11628	237336	1533939	5949147	17259390	41507642	87541245	1,68 · 10 <sup>8</sup>	2,98 · 10 <sup>8</sup>	4,98 · 10 <sup>8</sup>
	15	$N_{PT}$	0	0	0	1	15504	324632	2118760	8259888	24040016	57940519	1,22 · 10 <sup>8</sup>	2,35 · 10 <sup>8</sup>	4,17 · 10 <sup>8</sup>	6,99 · 10 <sup>8</sup>
	16	$N_{PT}$	0	0	0	1	20349	435897	2869685	11238513	32801517	79208745	1,68 · 10 <sup>8</sup>	3,21 · 10 <sup>8</sup>	5,72 · 10 <sup>8</sup>	9,59 · 10 <sup>8</sup>
	17	$N_{PT}$	0	0	0	1	26334	575757	3819816	15020334	43949268	1,06 · 10 <sup>8</sup>	2,25 · 10 <sup>8</sup>	4,32 · 10 <sup>8</sup>	7,7 · 10 <sup>8</sup>	1,28 · 10 <sup>9</sup>
	18	$N_{PT}$	0	0	0	1	33649	749398	5006386	19757815	57940519	1,4 · 10 <sup>8</sup>	2,98 · 10 <sup>8</sup>	5,72 · 10 <sup>8</sup>	1,02 · 10 <sup>9</sup>	1,7 · 10 <sup>9</sup>
	19	$N_{PT}$	0	0	0	1	42504	962598	6471002	25621596	75287520	1,83 · 10 <sup>8</sup>	3,88 · 10 <sup>8</sup>	7,45 · 10 <sup>8</sup>	1,33 · 10 <sup>9</sup>	2,23 · 10 <sup>9</sup>
	20	$N_{PT}$	0	0	0	1	53130	1221759	8259888	32801517	96560646	2,35 · 10 <sup>8</sup>	4,98 · 10 <sup>8</sup>	9,59 · 10 <sup>8</sup>	1,7 · 10 <sup>9</sup>	2,87 · 10 <sup>9</sup>

Таблиця 2.6 - Число реалізацій ТСК при  $m \in 2 \div 15$  для  $i=6$   $s \in 2 \div 20$

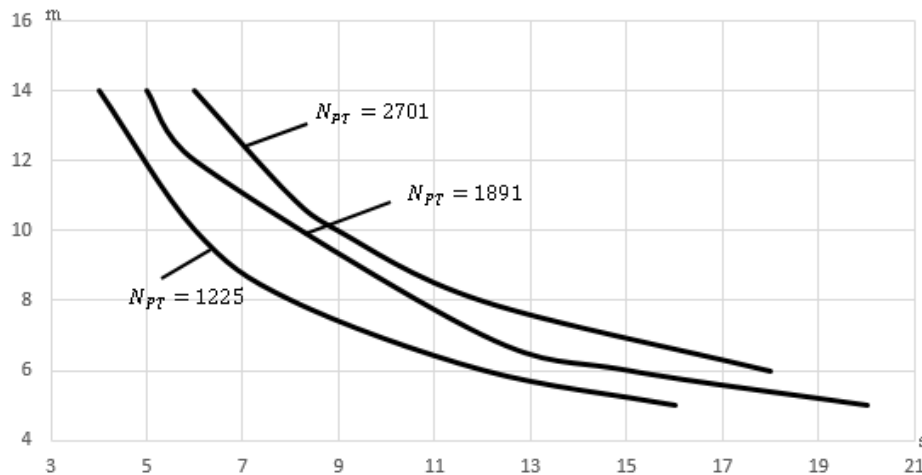
$i$	$s$	$m$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		$2^m$	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384	32768
6	2	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	28	210	924	3003	8008	18564	38760	74613	134596
	3	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	84	924	5005	18564	54264	134596	296910	593775	1107568
	4	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	210	3003	18564	74613	230230	593775	1344904	2760681	5245786
	5	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	462	8008	54264	230230	736281	1947792	4496388	9366819	18009460
	6	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	924	18564	134596	593775	1947792	5245786	12271512	25827165	50063860
	7	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	1716	38760	296010	1344904	4496388	12271512	28989675	61474519	1,2 · 10 <sup>9</sup>
	8	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	3003	74613	593775	2760681	9366819	25827165	61474519	1,31 · 10 <sup>9</sup>	2,57 · 10 <sup>9</sup>
	9	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	5005	134596	1107568	5245786	18009460	50063860	1,2 · 10 <sup>9</sup>	2,57 · 10 <sup>9</sup>	5,05 · 10 <sup>9</sup>
	10	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	8008	230230	1947792	9366819	32468436	90858768	2,19 · 10 <sup>9</sup>	4,7 · 10 <sup>9</sup>	9,27 · 10 <sup>9</sup>
	11	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	12376	376740	3262623	15890700	55525372	1,56 · 10 <sup>9</sup>	3,77 · 10 <sup>9</sup>	8,14 · 10 <sup>9</sup>	1,61 · 10 <sup>10</sup>
	12	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	18564	593775	5245786	25827165	90858768	2,57 · 10 <sup>9</sup>	6,23 · 10 <sup>9</sup>	1,35 · 10 <sup>10</sup>	2,67 · 10 <sup>10</sup>
	13	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	27132	906192	8145060	40475358	1,43 · 10 <sup>9</sup>	4,06 · 10 <sup>9</sup>	9,88 · 10 <sup>9</sup>	2,14 · 10 <sup>10</sup>	4,25 · 10 <sup>10</sup>
	14	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	38760	1344904	12271512	61474519	2,19 · 10 <sup>9</sup>	6,23 · 10 <sup>9</sup>	1,52 · 10 <sup>10</sup>	3,3 · 10 <sup>10</sup>	6,55 · 10 <sup>10</sup>
	15	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	54264	1947792	18009460	90858768	3,25 · 10 <sup>9</sup>	9,27 · 10 <sup>9</sup>	2,26 · 10 <sup>10</sup>	4,93 · 10 <sup>10</sup>	9,8 · 10 <sup>10</sup>
	16	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	74613	2760681	25827165	1,31 · 10 <sup>9</sup>	4,7 · 10 <sup>9</sup>	1,35 · 10 <sup>10</sup>	3,3 · 10 <sup>10</sup>	7,18 · 10 <sup>10</sup>	1,43 · 10 <sup>11</sup>
	17	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	100947	3838380	36288252	1,85 · 10 <sup>9</sup>	6,67 · 10 <sup>9</sup>	1,91 · 10 <sup>10</sup>	4,69 · 10 <sup>10</sup>	1,02 · 10 <sup>11</sup>	2,04 · 10 <sup>11</sup>
	18	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	134596	5245786	50063860	2,57 · 10 <sup>9</sup>	9,27 · 10 <sup>9</sup>	2,67 · 10 <sup>10</sup>	6,55 · 10 <sup>10</sup>	1,43 · 10 <sup>11</sup>	2,85 · 10 <sup>11</sup>
	19	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	177100	7059052	67945521	3,5 · 10 <sup>9</sup>	1,27 · 10 <sup>10</sup>	3,65 · 10 <sup>10</sup>	8,98 · 10 <sup>10</sup>	1,96 · 10 <sup>11</sup>	3,92 · 10 <sup>11</sup>
	20	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	230230	9366819	90858768	4,7 · 10 <sup>9</sup>	1,71 · 10 <sup>10</sup>	4,93 · 10 <sup>10</sup>	1,21 · 10 <sup>11</sup>	2,65 · 10 <sup>11</sup>	5,3 · 10 <sup>11</sup>

Таблиця 2.7 - Число реалізацій ТСК при  $m \in 2 \div 15$  для  $i=7$   $s \in 2 \div 20$ 

$i$	$S$	$m$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		$2^m$	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384	32768
7	2	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	36	330	1716	6435	19448	50388	116280	245157
	3	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	120	1716	11440	50388	170544	480700	1184040	2629575
	4	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	330	6434	50388	245157	888030	2629575	6724520	15380937
	5	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	792	19448	170544	888030	3365856	10295472	26978328	62891499
	6	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	1716	50388	480700	2629575	10295472	32224114	85900584	2,03 · 10 <sup>8</sup>
	7	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	3432	116280	1184040	6724520	26978328	85900584	2,32 · 10 <sup>8</sup>	5,53 · 10 <sup>8</sup>
	8	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	6435	245157	2629575	15380937	62891499	2,03 · 10 <sup>8</sup>	5,53 · 10 <sup>8</sup>	1,33 · 10 <sup>9</sup>
	9	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	11440	480700	5379616	32224114	1,34 · 10 <sup>8</sup>	4,36 · 10 <sup>8</sup>	1,2 · 10 <sup>9</sup>	2,9 · 10 <sup>9</sup>
	10	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	19448	888030	10295472	62891499	2,64 · 10 <sup>8</sup>	8,7 · 10 <sup>8</sup>	2,4 · 10 <sup>9</sup>	5,84 · 10 <sup>9</sup>
	11	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	31824	1560780	18643560	1,16 · 10 <sup>8</sup>	4,92 · 10 <sup>8</sup>	1,63 · 10 <sup>9</sup>	4,53 · 10 <sup>9</sup>	1,11 · 10 <sup>10</sup>
	12	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	50388	2629275	32224114	2,03 · 10 <sup>8</sup>	8,7 · 10 <sup>8</sup>	2,9 · 10 <sup>9</sup>	8,09 · 10 <sup>9</sup>	1,98 · 10 <sup>10</sup>
	13	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	77520	4272048	53524680	3,41 · 10 <sup>8</sup>	1,47 · 10 <sup>9</sup>	4,94 · 10 <sup>9</sup>	1,38 · 10 <sup>10</sup>	3,4 · 10 <sup>10</sup>
	14	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	116280	6724520	85900584	5,53 · 10 <sup>8</sup>	2,4 · 10 <sup>9</sup>	8,09 · 10 <sup>9</sup>	2,28 · 10 <sup>10</sup>	5,6 · 10 <sup>10</sup>
	15	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	170544	10295472	1,34 · 10 <sup>8</sup>	8,7 · 10 <sup>8</sup>	3,8 · 10 <sup>9</sup>	1,28 · 10 <sup>10</sup>	3,62 · 10 <sup>10</sup>	8,94 · 10 <sup>10</sup>
	16	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	245157	15380937	2,03 · 10 <sup>8</sup>	1,33 · 10 <sup>9</sup>	5,84 · 10 <sup>9</sup>	1,98 · 10 <sup>10</sup>	5,6 · 10 <sup>10</sup>	1,38 · 10 <sup>11</sup>
	17	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	346104	22481940	3,01 · 10 <sup>8</sup>	1,98 · 10 <sup>9</sup>	8,76 · 10 <sup>9</sup>	2,98 · 10 <sup>10</sup>	8,44 · 10 <sup>10</sup>	2,09 · 10 <sup>11</sup>
	18	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	480700	32224114	4,36 · 10 <sup>8</sup>	2,9 · 10 <sup>9</sup>	1,28 · 10 <sup>10</sup>	4,38 · 10 <sup>10</sup>	1,24 · 10 <sup>11</sup>	3,08 · 10 <sup>11</sup>
	19	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	657800	45379620	6,21 · 10 <sup>8</sup>	4,15 · 10 <sup>9</sup>	1,85 · 10 <sup>10</sup>	6,31 · 10 <sup>10</sup>	1,8 · 10 <sup>11</sup>	4,46 · 10 <sup>11</sup>
	20	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	888030	62891499	8,7 · 10 <sup>8</sup>	5,84 · 10 <sup>9</sup>	2,61 · 10 <sup>10</sup>	8,94 · 10 <sup>10</sup>	2,55 · 10 <sup>11</sup>	6,33 · 10 <sup>11</sup>

Таблиця 2.8 - Число реалізацій ТСК при  $m \in 2 \div 15$  для  $i=8$   $s \in 2 \div 20$ 

$i$	$S$	$m$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		$2^m$	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384	32768
8	2	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	45	495	3003	12870	43758	125970	319770
	3	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	165	3003	24310	125970	490314	1562275	4292145
	4	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	495	12870	125970	735471	3108105	10518300	30260340
	5	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	1287	43758	490314	3108104	13884156	48903492	1,45 · 10 <sup>8</sup>
	6	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	3003	125970	1562275	10518300	48903492	1,77 · 10 <sup>8</sup>	5,37 · 10 <sup>8</sup>
	7	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	6435	319770	4292145	30260340	1,45 · 10 <sup>8</sup>	5,37 · 10 <sup>8</sup>	1,65 · 10 <sup>9</sup>
	8	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	12870	735471	10518300	76904685	3,77 · 10 <sup>8</sup>	1,42 · 10 <sup>9</sup>	4,43 · 10 <sup>9</sup>
	9	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	24310	1562275	23535820	1,77 · 10 <sup>8</sup>	8,86 · 10 <sup>8</sup>	3,38 · 10 <sup>9</sup>	1,06 · 10 <sup>10</sup>
	10	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	43758	3108105	48903492	3,77 · 10 <sup>8</sup>	1,92 · 10 <sup>9</sup>	7,39 · 10 <sup>9</sup>	2,34 · 10 <sup>10</sup>
	11	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	75582	5852925	95548245	7,53 · 10 <sup>8</sup>	3,87 · 10 <sup>9</sup>	1,51 · 10 <sup>10</sup>	4,81 · 10 <sup>10</sup>
	12	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	125970	10518300	1,77 · 10 <sup>8</sup>	1,42 · 10 <sup>9</sup>	7,39 · 10 <sup>9</sup>	2,9 · 10 <sup>10</sup>	9,31 · 10 <sup>10</sup>
	13	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	203490	18156204	3,14 · 10 <sup>8</sup>	2,56 · 10 <sup>9</sup>	1,34 · 10 <sup>10</sup>	5,31 · 10 <sup>10</sup>	1,71 · 10 <sup>11</sup>
	14	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	319770	30260340	5,37 · 10 <sup>8</sup>	4,43 · 10 <sup>9</sup>	2,34 · 10 <sup>10</sup>	9,31 · 10 <sup>10</sup>	3,02 · 10 <sup>11</sup>
	15	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	490314	48903492	8,86 · 10 <sup>8</sup>	7,39 · 10 <sup>9</sup>	3,94 · 10 <sup>10</sup>	1,57 · 10 <sup>11</sup>	5,12 · 10 <sup>11</sup>
	16	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	735471	76904685	1,42 · 10 <sup>9</sup>	1,2 · 10 <sup>10</sup>	6,43 · 10 <sup>10</sup>	2,58 · 10 <sup>11</sup>	8,4 · 10 <sup>11</sup>
	17	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	1081575	1,18 · 10 <sup>8</sup>	2,22 · 10 <sup>9</sup>	1,89 · 10 <sup>10</sup>	1,02 · 10 <sup>11</sup>	4,1 · 10 <sup>11</sup>	1,34 · 10 <sup>12</sup>
	18	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	1562275	1,77 · 10 <sup>8</sup>	3,38 · 10 <sup>9</sup>	2,9 · 10 <sup>10</sup>	1,57 · 10 <sup>11</sup>	6,35 · 10 <sup>11</sup>	2,08 · 10 <sup>12</sup>
	19	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	2220075	2,61 · 10 <sup>8</sup>	5,05 · 10 <sup>9</sup>	4,36 · 10 <sup>10</sup>	2,38 · 10 <sup>11</sup>	9,63 · 10 <sup>11</sup>	3,17 · 10 <sup>12</sup>
	20	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	3108105	3,77 · 10 <sup>8</sup>	7,39 · 10 <sup>9</sup>	6,43 · 10 <sup>10</sup>	3,52 · 10 <sup>11</sup>	1,43 · 10 <sup>12</sup>	4,71 · 10 <sup>12</sup>

Рисунок 2.1 – Залежності  $m = f(s)$  при  $N = \text{const}$ 

## 2.2 Обчислення пропускної здатності каналу при таймерних сигнальних конструкціях

На основі даних взятих з таблиці 2.5, було проведено дослідження залежності пропускної здатності каналів з різним рівнем флуктуаційних шумів за наступними формулами:

- значення пропускної здатності каналу зв'язку [2]:

$$C_m = \frac{1}{m} \cdot (\log_2 N_{PT} - H_{BT}), \quad (2.2)$$

де  $H_{BT}$  – визначає втрати в каналі [2]:

$$H_{BT} = - \left[ P_B \cdot \log_2 P_B + (1 - P_B) \cdot \log_2 \frac{1 - P_B}{N_{PT} - 1} \right], \quad (2.3)$$

де  $P_B$  ймовірність вірного приймання ТСК [1]:

$$P_B = \left[ 2\Phi \cdot \left( \frac{\Delta_{\text{опт}}}{2 \cdot \sigma_K} \right) \right]^i, \quad (2.4)$$

де  $\Delta_{\text{опт}} = (3,8...5,5)$ ;  $\Phi(x)$  - інтеграл імовірностей:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_0^x e^{-\frac{z^2}{2}} dz. \quad (2.5)$$

Середнє число моментів модуляції дорівнює[1]:

$$\bar{i} = \sum_{i=1}^m P[N_P(i)]i \quad (2.6)$$

$$P[N_P(i)] = \frac{N_P}{N_{P\Sigma}}$$

Середньоквадратичне відхилення зміщення фронту сигналу на виході каналу:

$$\sigma_K = \frac{4}{h}, \quad (2.7)$$

де  $h$  – відношення сигнал/завада,  $h = \frac{U_c}{U_z}$ .

Граничне значення пропускної здатності каналу зв'язку буде визначатися виразом [2]:

$$C_{\max} = \frac{\log_2 N_{P\Sigma}}{T_{СК}}, \quad (2.8)$$

де  $N_{p\Sigma}$  – загальна кількість реалізацій, які використовуються з урахуванням кількості значущих моментів модуляції ( $i$ );

$T_{CK}$  – часовий інтервал сигнальної конструкції в числі найквістових елементів:

$$T_{CK} = m \cdot t_0, \quad (2.9)$$

де  $t_0 = 0,9575c$ .

Результати досліджень подані в таблицях 2.9, 2.10, 2.11, 2.12, 2.13.

Таблиця 2.9 – Значення пропускної здатності каналу в залежності від інформаційних параметрів  $s$ ,  $m$  та  $h = 8$

$S$	$m$			НВТ			$C_m$			
	7	8	9							
2	126	462	1287	0,000722	0,00078	0,000825	0,9966512	1,106371	1,147663	
3	462	2002	6188	0,00078	0,000845	0,000895	1,2644242	1,370798	1,399374	
4	1287	6188	20349	0,000825	0,000895	0,000948	1,4755673	1,574295	1,590191	
5	3003	15504	53130	0,000863	0,000936	0,000991	1,6501894	1,739927	1,744028	
6	6188	33649	118755	0,000895	0,000971	0,001027	1,7991946	1,879663	1,872956	
7	11628	65780	237336	0,000923	0,001001	0,001058	1,9291988	2,000545	1,983946	
8	20349	118755	435897	0,000948	0,001027	0,001085	2,0445317	2,107075	2,081394	
9	33649	201376	749398	0,000971	0,00105	0,001109	2,1481865	2,20231	2,168252	
							$C_{max}$	2,4173169	2,38246	2,311689

Таблиця 2.10 – Значення пропускної здатності каналу в залежності від інформаційних параметрів  $s$ ,  $m$  та  $h = 5$

$S$	$m$			НВТ			$C_m$			
	7	8	9							
2	126	462	1287	0,309447	0,351426	0,384424	0,9525476	1,06254	1,105041	
3	462	2002	6188	0,351426	0,398645	0,434953	1,2143319	1,321073	1,351145	
4	1287	6188	20349	0,384424	0,434953	0,473247	1,4207675	1,520038	1,537714	
5	3003	15504	53130	0,411692	0,4645	0,504118	1,5914995	1,681982	1,688125	
6	6188	33649	118755	0,434953	0,489426	0,52999	1,7371863	1,818606	1,814182	
7	11628	65780	237336	0,455246	0,510988	0,552262	1,8642956	1,936797	1,922701	
8	20349	118755	435897	0,473247	0,52999	0,571816	1,9770604	2,040955	2,017979	
9	33649	201376	749398	0,489426	0,546977	0,589245	2,0784072	2,134069	2,102903	
							$C_{max}$	2,4173169	2,38246	2,311689

Таблиця 2.11 – Значення пропускної здатності каналу в залежності від інформаційних параметрів  $s$ ,  $m$  та  $h = 10$

$S$	$m$			$H_{BT}$			$C_m$		
	7	8	9						
2	126	462	1287	$2,78 \cdot 10^{-6}$	$2,94 \cdot 10^{-6}$	$3,07 \cdot 10^{-6}$	0,9967539	1,106468	1,147755
3	462	2002	6188	$2,94 \cdot 10^{-6}$	$3,13 \cdot 10^{-6}$	$3,27 \cdot 10^{-6}$	1,2645352	1,370903	1,399473
4	1287	6188	20349	$3,07 \cdot 10^{-6}$	$3,27 \cdot 10^{-6}$	$3,42 \cdot 10^{-6}$	1,4756848	1,574407	1,590296
5	3003	15504	53130	$3,18 \cdot 10^{-6}$	$3,38 \cdot 10^{-6}$	$3,54 \cdot 10^{-6}$	1,6503122	1,740044	1,744137
6	6188	33649	118755	$3,27 \cdot 10^{-6}$	$3,48 \cdot 10^{-6}$	$3,64 \cdot 10^{-6}$	1,799322	1,879784	1,873069
7	11628	65780	237336	$3,35 \cdot 10^{-6}$	$3,57 \cdot 10^{-6}$	$3,73 \cdot 10^{-6}$	1,9293303	2,00067	1,984063
8	20349	118755	435897	$3,42 \cdot 10^{-6}$	$3,64 \cdot 10^{-6}$	$3,8 \cdot 10^{-6}$	2,0446667	2,107203	2,081514
9	33649	201376	749398	$3,48 \cdot 10^{-6}$	$3,71 \cdot 10^{-6}$	$3,87 \cdot 10^{-6}$	2,1483246	2,202441	2,168374
							$C_{max}$	2,4173169	2,311689

Таблиця 2.12 - Значення пропускної здатності каналу в залежності від інформаційних параметрів  $s$ ,  $m$  та  $h = 12$

$S$	$m$			$H_{BT}$			$C_m$		
	7	8	9						
2	126	462	1287	$2,99 \cdot 10^{-7}$	$3,15 \cdot 10^{-7}$	$3,27 \cdot 10^{-7}$	0,9967542	1,106469	1,147755
3	462	2002	6188	$3,15 \cdot 10^{-7}$	$3,33 \cdot 10^{-7}$	$3,46 \cdot 10^{-7}$	1,2645355	1,370903	1,399473
4	1287	6188	20349	$3,27 \cdot 10^{-7}$	$3,46 \cdot 10^{-7}$	$3,61 \cdot 10^{-7}$	1,4756851	1,574407	1,590297
5	3003	15504	53130	$3,38 \cdot 10^{-7}$	$3,58 \cdot 10^{-7}$	$3,73 \cdot 10^{-7}$	1,6503126	1,740044	1,744138
6	6188	33649	118755	$3,46 \cdot 10^{-7}$	$3,67 \cdot 10^{-7}$	$3,83 \cdot 10^{-7}$	1,7993224	1,879784	1,87307
7	11628	65780	237336	$3,54 \cdot 10^{-7}$	$3,75 \cdot 10^{-7}$	$3,91 \cdot 10^{-7}$	1,9293307	2,00067	1,984063
8	20349	118755	435897	$3,61 \cdot 10^{-7}$	$3,83 \cdot 10^{-7}$	$3,99 \cdot 10^{-7}$	2,0446671	2,107204	2,081514
9	33649	201376	749398	$3,67 \cdot 10^{-7}$	$3,89 \cdot 10^{-7}$	$4,05 \cdot 10^{-7}$	2,1483251	2,202441	2,168375
							$C_{max}$	2,4173169	2,311689

Таблиця 2.13 - Значення пропускної здатності каналу в залежності від інформаційних параметрів  $s$ ,  $m$  та  $h = 14$

$S$	$m$			$H_{BT}$			$C_m$		
	7	8	9						
2	126	462	1287	$2,99 \cdot 10^{-7}$	$3,15 \cdot 10^{-7}$	$3,27 \cdot 10^{-7}$	0,99967542	1,106469	1,147755
3	462	2002	6188	$3,15 \cdot 10^{-7}$	$3,33 \cdot 10^{-7}$	$3,46 \cdot 10^{-7}$	1,2645355	1,370903	1,399473
4	1287	6188	20349	$3,27 \cdot 10^{-7}$	$3,46 \cdot 10^{-7}$	$3,61 \cdot 10^{-7}$	1,4756851	1,574407	1,5590297
5	3003	15504	53130	$3,38 \cdot 10^{-7}$	$3,58 \cdot 10^{-7}$	$3,73 \cdot 10^{-7}$	1,6503126	1,740044	1,744138
6	6188	33649	118755	$3,46 \cdot 10^{-7}$	$3,67 \cdot 10^{-7}$	$3,83 \cdot 10^{-7}$	1,7993224	1,879784	1,87307
7	11628	65780	237336	$3,54 \cdot 10^{-7}$	$3,75 \cdot 10^{-7}$	$3,91 \cdot 10^{-7}$	1,9293307	2,00067	1,984063
8	20349	118755	435897	$3,61 \cdot 10^{-7}$	$3,83 \cdot 10^{-7}$	$3,99 \cdot 10^{-7}$	2,0446671	2,107204	2,081514
9	33649	201376	749398	$3,67 \cdot 10^{-7}$	$3,89 \cdot 10^{-7}$	$4,05 \cdot 10^{-7}$	2,1483251	2,200441	2,168375
							$C_{max}$	2,4173169	2,311689

З рис. 2.2 по рис. 2.6 подано залежності пропускної здатності каналів як функцій  $s$  з даних таблиць 2.9, 2.10, 2.11, 2.12 та 2.13 (криві 1...3 для  $h = 8$  і  $m = 9, 8, 7$  відповідно, криві 4...6 для  $h = 5$  і  $m = 9, 8, 7$  відповідно, криві 7...9 для  $h = 10$  і  $m = 9, 8, 7$  відповідно, криві 10...12 для  $h = 12$  і  $m = 9, 8, 7$  відповідно, криві 13...15 для  $h = 14$  і  $m = 9, 8, 7$  відповідно).

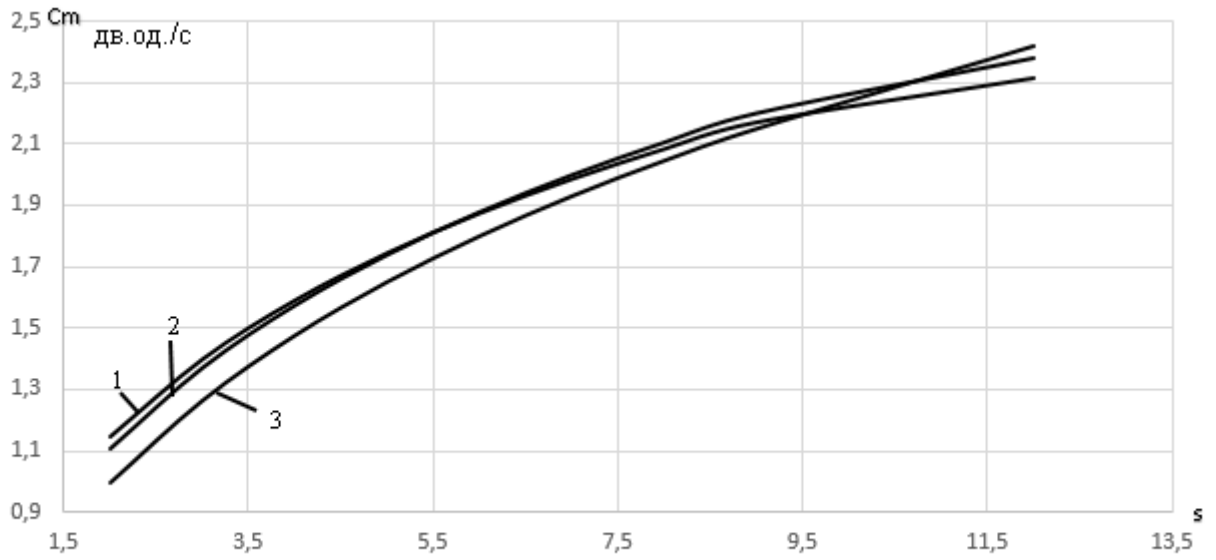


Рисунок 2.2 – Залежність пропускної здатності каналу  
 $C_i = f(s)$  при  $h = 8, m = 9,8,7$

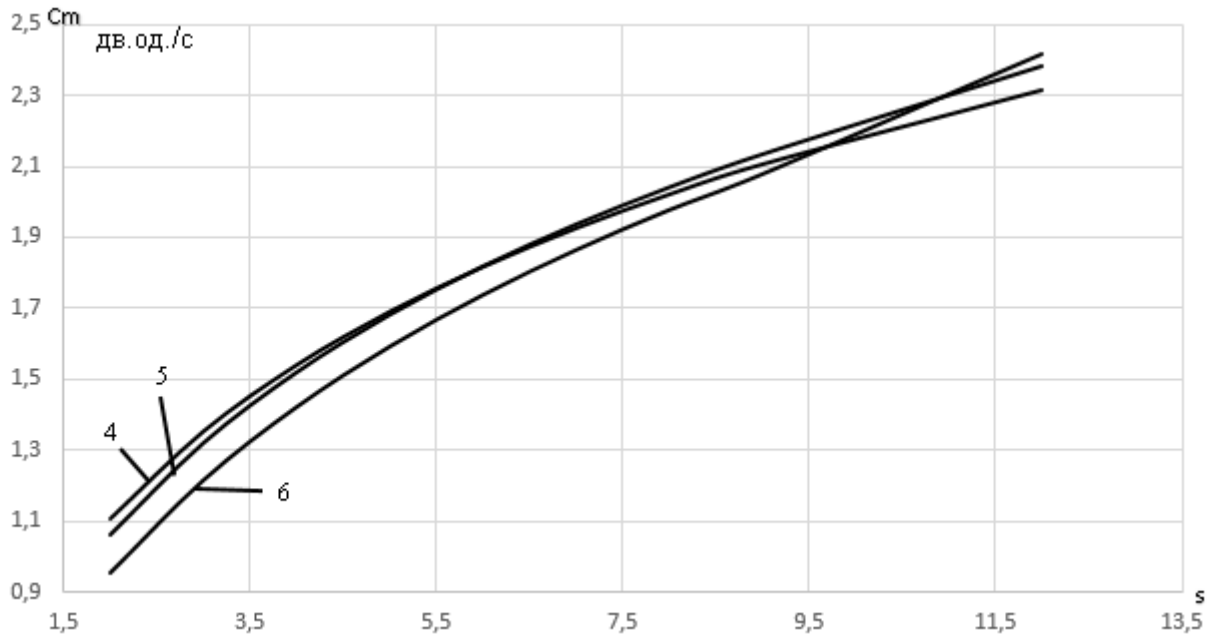


Рисунок 2.3 – Залежність пропускної здатності каналу  
 $C_i = f(s)$  при  $h = 5, m = 9,8,7$

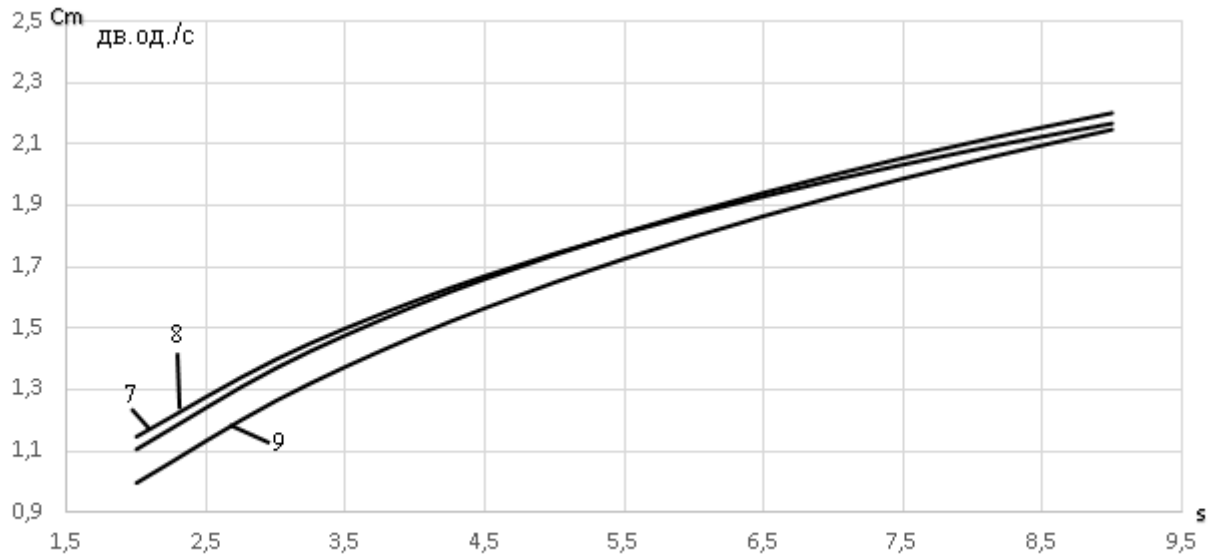


Рисунок 2.4 – Залежність пропускної здатності каналу  
 $C_i = f(s)$  при  $h = 10, m = 9, 8, 7$

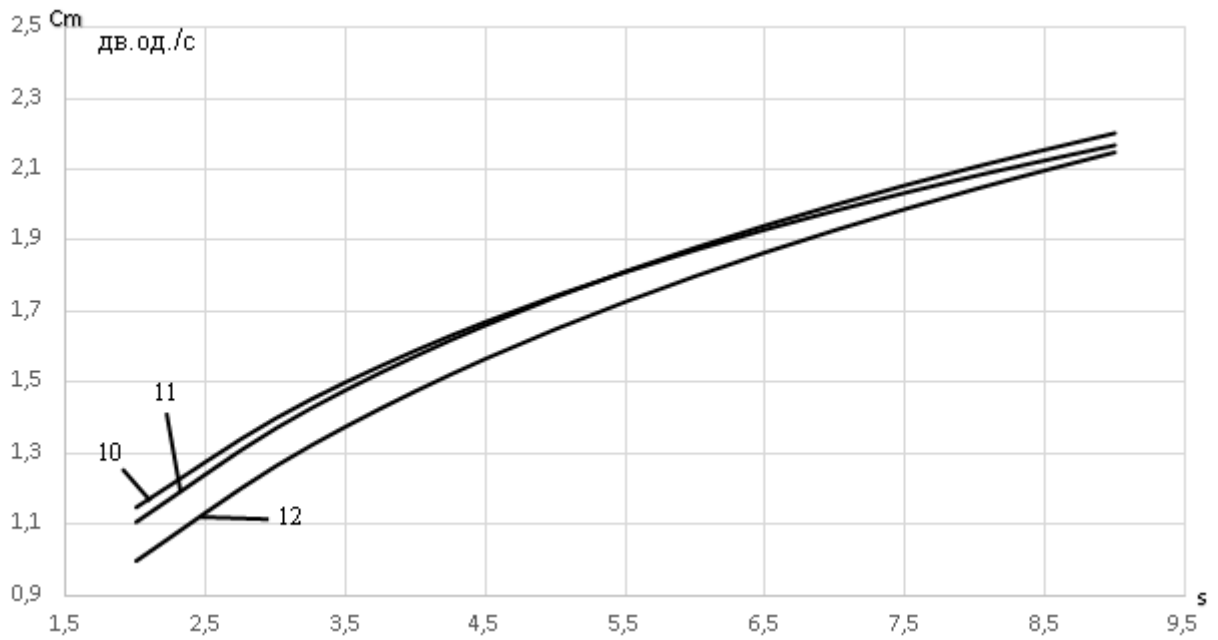


Рисунок 2.5 – Залежність пропускної здатності каналу  
 $C_i = f(s)$  при  $h = 12, m = 9, 8, 7$

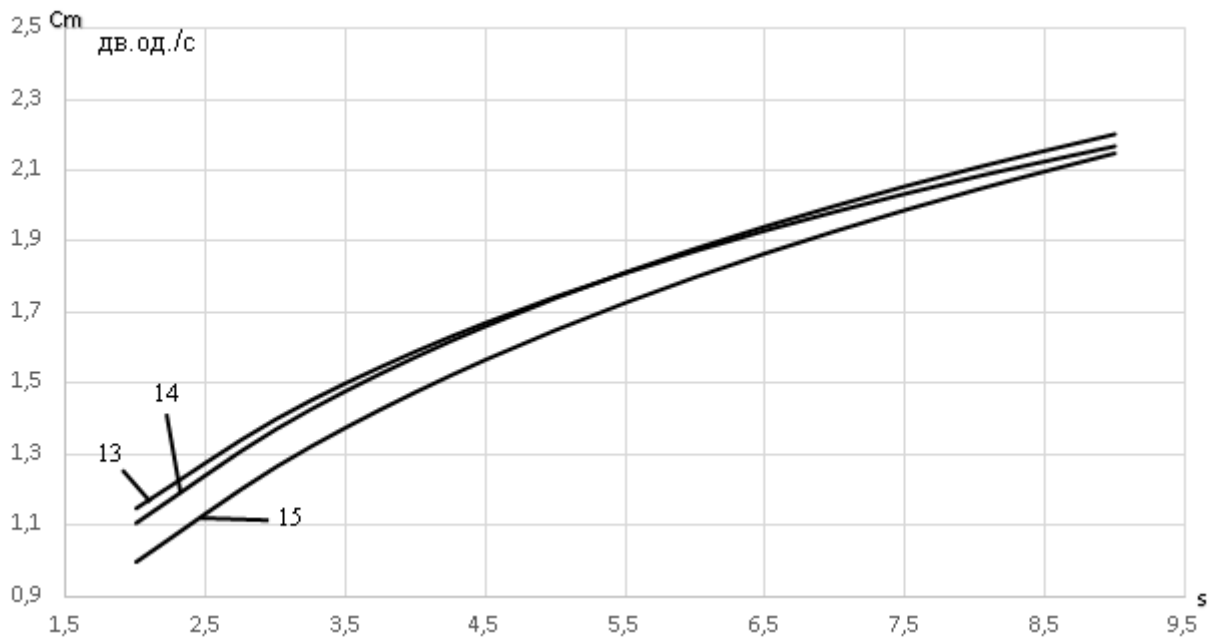


Рисунок 2.6 – Залежність пропускної здатності каналу  $C_i = f(s)$  при  $h = 14, m = 9,8,7$

### Висновки до другого розділу

1. При збільшенні  $S$  з 2 до 9 зростає число реалізацій ТСК та пропускна здатність каналу. При  $s = 2$  та збільшенні  $m$  з 7 до 9 пропускна здатність каналу зросте на 15,2%. При  $s = 9$  та збільшенні  $m$  з 7 до 9 пропускна здатність каналу зросте на 0,93%(відношення сигнал/завада  $h = 8$ ).

2. При збільшенні  $S$  з 2 до 9 зростає число реалізацій ТСК та пропускна здатність каналу. При  $s = 2$  та збільшенні  $m$  з 7 до 9 пропускна здатність каналу зросте на 16%. При  $s = 9$  та збільшенні  $m$  з 7 до 9 пропускна здатність каналу зросте на 0,2%(відношення сигнал/завада  $h = 5$ ).

3. Максимальна пропускна здатність каналу зв'язку ( $C_{max} = 2,417$  дв.од./с) досягається за умови, що  $t_0 = 0,9575c$ ,  $m = 7$ ,  $N_p \Sigma = 992687$ .

4. При моделюванні таймерних сигнальних конструкцій досягнуто підвищення ефективності пропускної здатності каналу зв'язку на 8,22% в умовах дії флуктуаційних завад при вказаній імовірності бітових помилок для забезпечення заданої якості зв'язку.

### 3 ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ЄМНОСТІ, ЕНТРОПІЇ ПОВІДОМЛЕНЬ ТА ЙМОВІРНІСТЬ ПОМИЛКИ В $M$ -ІТТИХ СИСТЕМАХ ФАЗОВОЇ МОДУЛЯЦІЇ

#### 3.1 Імовірність помилки в $M$ -іттих системах фазової модуляції

Для порівняння технічних характеристик цифрових систем звичайно використовують поняття вірогідності помилки. Розглянемо методи кількісної оцінки вірогідності символної та бітової помилки в  $M$ -іттих системах фазової модуляції [2].

Відомо, що імовірність помилки залежить від відношення  $E_b / N_0$ . Тут  $E_b$  – енергія, що витрачається для передачі одного біта інформаційного потоку, а  $N_0$  – спектральна щільність потужності шуму. Обидві величини вимірюються на вході демодулятора приймача. З урахуванням їх розмірностей [2]:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{\text{джоуль}}{\text{ватт/герц}} = \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{Вт} \cdot \text{с}}. \quad (3.1)$$

Таким чином, відношення  $E_b / N_0$  є безрозмірним.

Рис. 3.1 ілюструє теоретичну залежність вірогідності помилки від  $E_b / N_0$  при когерентній і автокорреляційній демодуляції.

Справедливі наступні співвідношення:

$$Q(x) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( x / \sqrt{2} \right) \right], \quad (3.2)$$

$$Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( x / \sqrt{2} \right). \quad (3.3)$$

де  $\text{erf}(x)$  і  $\text{erfc}(x)$  – вбудовані функції середовища MATLAB.

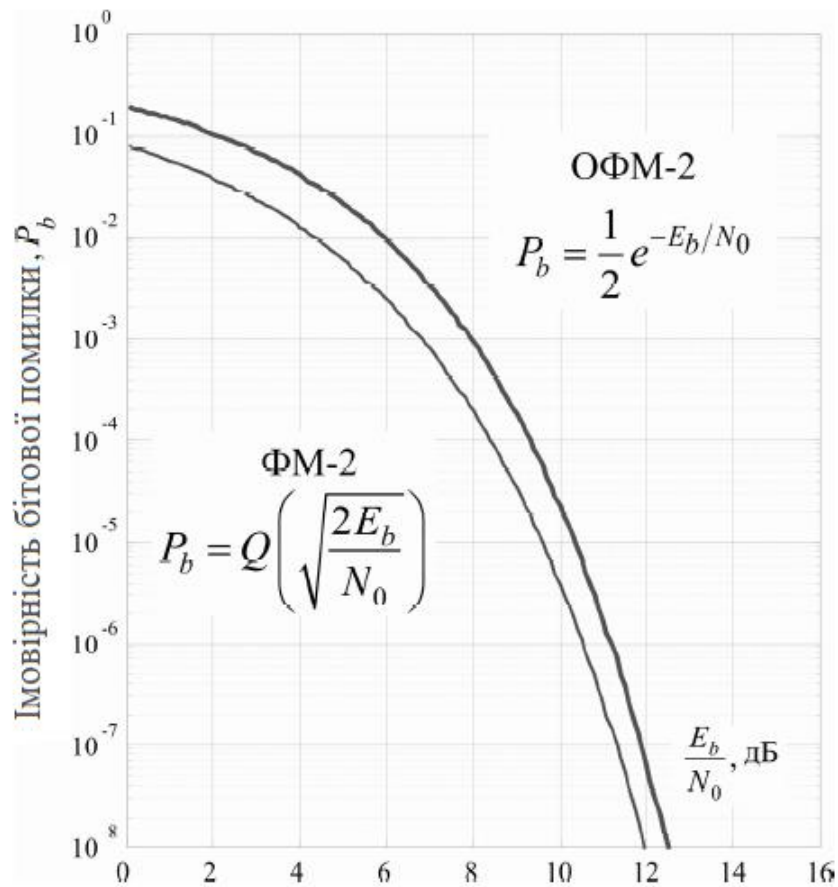


Рисунок 3.1 – Імовірність помилки для двійкових ФМ систем

В системі з двійковою фазовою маніпуляцією імовірність біткової помилки визначається по формулі [1]:

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right), \quad (3.4)$$

Функція  $Q(x)$ , яка називається гауссовим інтегралом помилок, визначається наступним чином:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du. \quad (3.5)$$

Ця функція приведена у додатку А.

Імовірність символної помилки для  $M$ -іттих систем ( $M > 2$ ) з когерентним виявленням можна виразити як:

$$P_M = 2Q\left(\sqrt{\frac{2E_s}{N_0} \sin \frac{\pi}{M}}\right), \quad (3.6)$$

де  $E_s = E_b(\log_2 M)$  – енергія, яка приходить на символ;  $M$  – розмір множин символів.

Слід зауважити, що значення  $P_b$  менше або рівне  $P_M$ . Можна показати, що при використанні коду Грея ці ймовірності помилки зв'язані співвідношенням [2]:

$$P_b = \left(\sqrt{\frac{2E_s}{N_0} \sin \frac{\pi}{M}}\right), \quad P_M \square 1. \quad (3.7)$$

Зокрема, системи з BPSK (Binary Phase Shift Keying) та QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) мають однакові ймовірності бітової помилки. Формула (3.6) показує, що ймовірності символних помилок у цих системах відрізняються. Для двійкової модуляції  $P_M = P_b$ , а для квадратурної  $P_M = 2P_b$ .

На рис. 3.4 представлена теоретична залежність  $P_M$  від відношення сигнал/шум для багатофазових систем з когерентним виявленням [1].

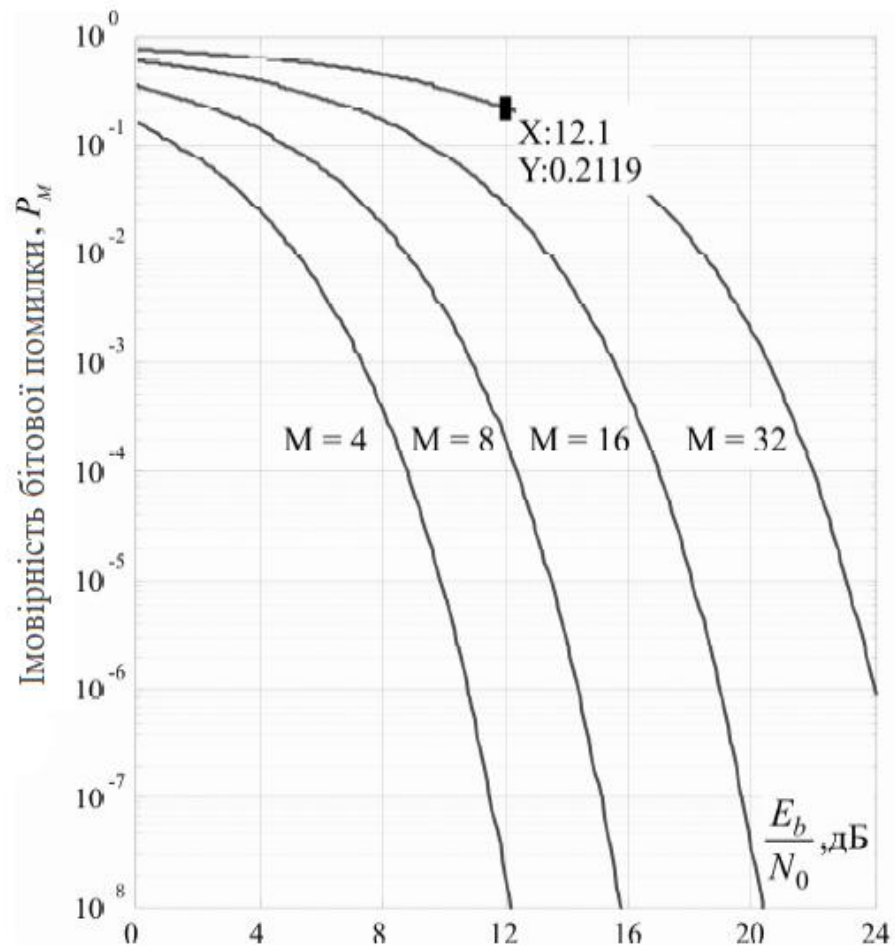


Рисунок 3.2 – Імовірність символної помилки для багатофазної передачі з когерентним виявленням.

Потужність сигналу на вході приймача визначається за формулою [2]:

$$P_c = 10^{0.1 \cdot P_c} . \quad (3.8)$$

Тривалість тактового інтервалу, тобто тривалість одного біту, рівна [2]:

$$T = 1 / R , \quad (3.9)$$

де  $R$  – швидкість передачі інформації.

Енергія, яка використовується для передачі одного біту, визначається наступним чином [2]:

$$E_b = P_c \cdot T . \quad (3.10)$$

Одностороння спектральна щільність потужності білого шуму може бути представлена як [2]:

$$N_0 = nkT_0, \quad (3.11)$$

де  $n = 7,94$  – коефіцієнт шуму приймача;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Bm}$  - стала Больцмана;  $T_0$  - шумова температура в градусах Кельвіна.

В табл. 3.1; 3.2; 3.3 наведенні розрахункові значення ймовірності бітової помилки в залежності від:

1) зміни швидкості передачі інформації, шумової температури та відношенні сигнал/шум при потужності сигналу на вході приймача  $P_c = -105$  дБВт;

2) потужності сигналу на вході приймача, швидкості передачі інформації та відношенні сигнал/шум при шумовій температурі  $T = 285\text{K}$ ;

3) шумової температури, потужності сигналу на вході приймача та відношенні сигнал/шум при швидкості передачі інформації  $R = 100$  Мбіт/с.

На рисунках 3.3, 3.4 і 3.5 зображено ймовірність бітової помилки в залежності від швидкості передачі інформації, шумової температури та потужності сигналу на вході приймача.

Таблиця 3.1 – Ймовірність бітової помилки в залежності від швидкості передачі інформації, шумової температури та відношенні сигнал/шум при потужності сигналу на вході приймача  $P_c = -105$  дБВт

R, Мбіт/с	$T_0$ , К	$E_b/N_0$	$E_b/N_0$ , дБ	$P_b$
100	284	10.16	10.07	$0,3241 \cdot 10^{-5}$
	294	9.82	9.920	$4,71 \cdot 10^{-6}$
	304	9.49	9.774	$6,50 \cdot 10^{-6}$
120	284	8.47	9.278	$1,89 \cdot 10^{-5}$
	294	8.18	9.128	$2,62 \cdot 10^{-5}$
	304	7.91	8.982	$3,48 \cdot 10^{-5}$
140	284	7.26	8.609	$6,94 \cdot 10^{-5}$
	294	7.01	8.458	$9,03 \cdot 10^{-5}$
	304	6.78	8.313	$1,15 \cdot 10^{-4}$
160	284	6.35	8.029	$1,83 \cdot 10^{-4}$
	294	6.14	7.878	$2,30 \cdot 10^{-4}$
	304	5.93	7.733	$2,86 \cdot 10^{-4}$
180	284	5.65	7.517	$3,89 \cdot 10^{-4}$
	294	5.45	7.367	$4,79 \cdot 10^{-4}$
	304	5.27	7.222	$5,81 \cdot 10^{-4}$
200	284	5.08	7.060	$7,17 \cdot 10^{-4}$
	294	4.91	6.909	$8,65 \cdot 10^{-4}$
	304	4.75	6.764	$1,03 \cdot 10^{-3}$
220	284	4.62	6.646	$1,19 \cdot 10^{-3}$
	294	4.46	6.495	$1,41 \cdot 10^{-3}$
	304	4.32	6.350	$1,65 \cdot 10^{-3}$
240	284	4.23	6.268	$1,81 \cdot 10^{-3}$
	294	4.09	6.117	$2,12 \cdot 10^{-3}$
	304	3.96	5.972	$2,46 \cdot 10^{-3}$
260	284	3.91	5.920	$2,59 \cdot 10^{-3}$
	294	3.78	5.770	$3,00 \cdot 10^{-3}$
	304	3.65	5.625	$3,44 \cdot 10^{-3}$

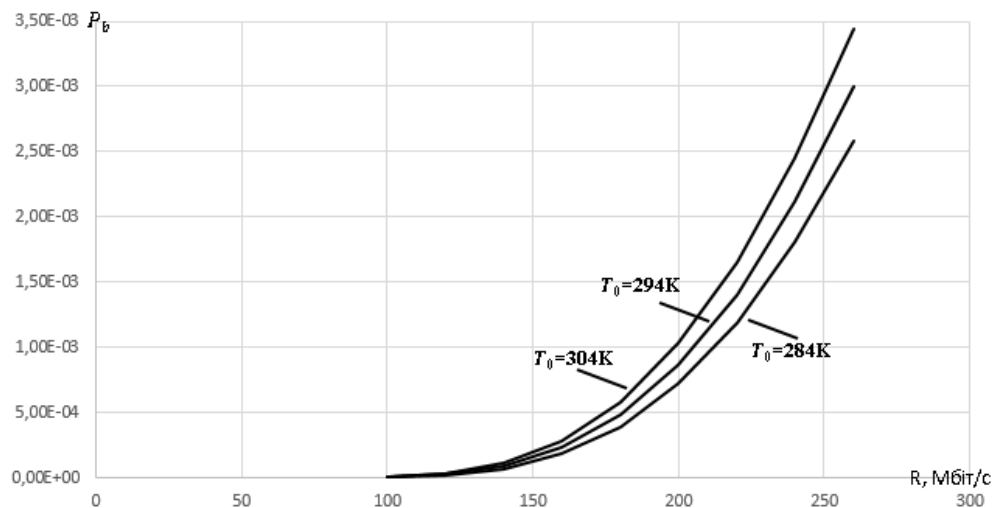


Рисунок 3.3 – Ймовірність бітової помилки в залежності від швидкості передачі інформації, шумової температури при потужності сигналу на вході приймача  $P_c = -105$  дБВт

Таблиця 3.2 – Ймовірність бітової помилки в залежності від потужності сигналу на вході приймача , швидкості передачі інформації та відношенні сигнал/шум при шумовій температурі  $T=285\text{K}$

$P_c$ , дБВт	$R$ , Мбіт/с	$E_b/N_0$	$E_b/N_0$ , дБ	$P_b$
-100	100	32.02	15.055	$6,11 \cdot 10^{-16}$
	160	20.01	13.013	$1,25 \cdot 10^{-10}$
	220	14.56	11.630	$3,42 \cdot 10^{-8}$
-105	100	10.13	10.055	$3,39 \cdot 10^{-6}$
	160	6.33	8.013	$1,87 \cdot 10^{-4}$
	220	4.60	6.630	$1,21 \cdot 10^{-3}$
-110	100	3.20	5.055	$5,69 \cdot 10^{-3}$
	160	2.00	3.013	$2,27 \cdot 10^{-2}$
	220	1.46	1.630	$4,40 \cdot 10^{-2}$
-115	100	1.01	0.055	$7,74 \cdot 10^{-2}$
	160	0.63	-1.987	$1,30 \cdot 10^{-1}$
	220	0.46	-3.370	$1,69 \cdot 10^{-1}$
-120	100	0.32	-4.945	$2,12 \cdot 10^{-1}$
	160	0.20	-6.987	$2,63 \cdot 10^{-1}$
	220	0.15	-8.370	$2,95 \cdot 10^{-1}$

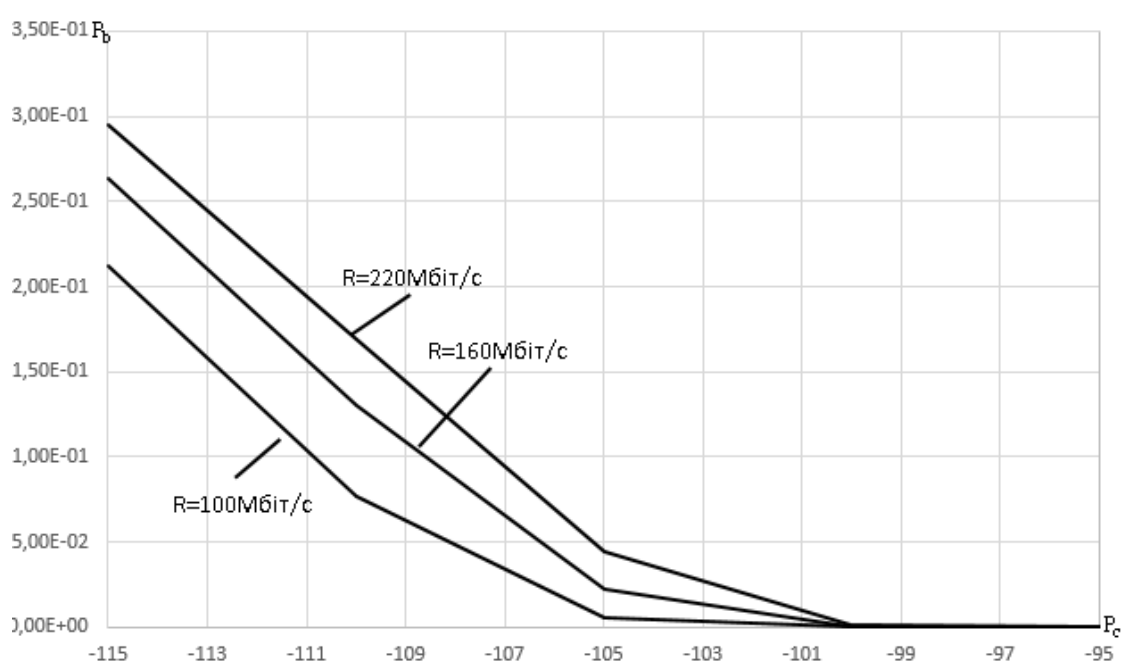


Рисунок 3.4 – Ймовірність бітової помилки в залежності від потужності сигналу на вході приймача , швидкості передачі інформації при шумовій температурі  $T=285\text{K}$ .

Таблиця 3.3 – Ймовірність бітової помилки в залежності від шумової температури , потужності сигналу на вході приймача та відношенні сигнал/шум при швидкості передачі інформації  $R=100$  Мбіт/с

$T_0, K$	$P_c, \text{дБВт}$	$E_b/N_0$	$E_0/N_0, \text{дБ}$	$P_b$
284	-105	10,16	10,070	$4,71 \cdot 10^{-6}$
	-115	1,02	0,070	$6,50 \cdot 10^{-6}$
294	-105	9,82	9,920	$4,69 \cdot 10^{-6}$
	-115	0,98	-0,080	$8,06 \cdot 10^{-2}$
304	-105	9,49	9,774	$6,58 \cdot 10^{-6}$
	-115	0,95	-0,226	$8,41 \cdot 10^{-2}$
309	-105	9,34	9,703	$7,73 \cdot 10^{-6}$
	-115	0,93	-0,297	$8,59 \cdot 10^{-2}$

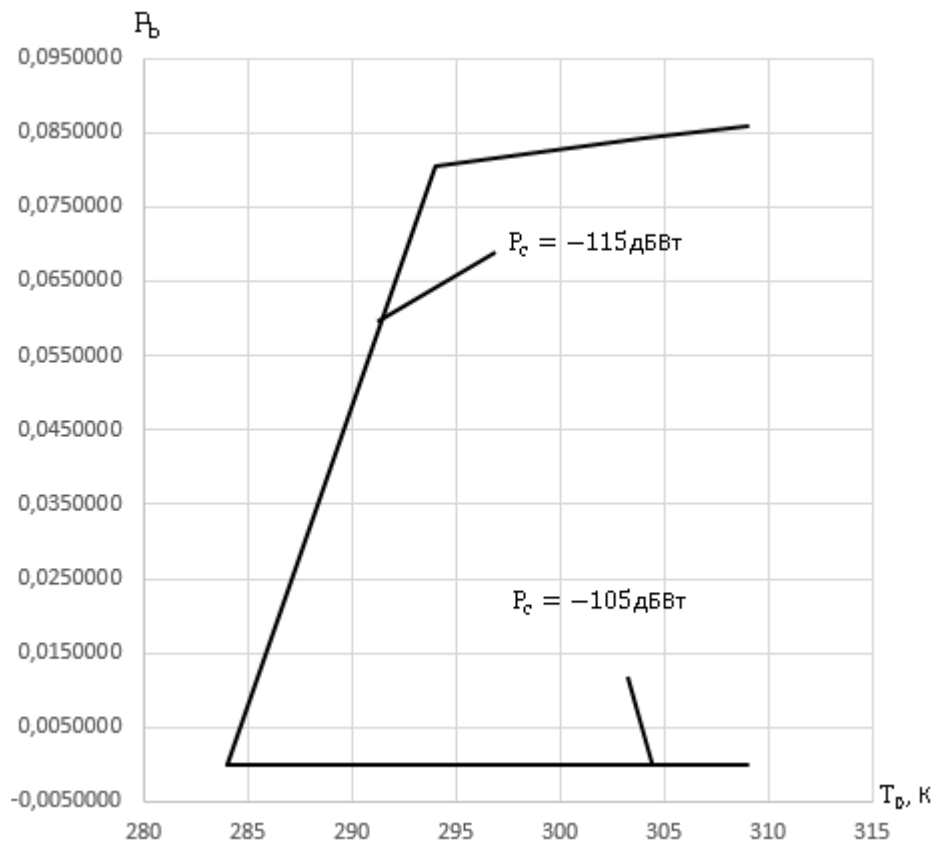


Рисунок 3.5 – Ймовірність бітової помилки в залежності від шумової температури та потужності сигналу на вході приймача при швидкості передачі інформації  $R=100$  Мбіт/с.

### 3.2 Збільшення інформаційної ємності та ентропії кодового слова за постійної тривалості.

Інформаційну ємність можна висначити як [1]:

$$I_H = \frac{\log_2 N_{PT}}{m}. \quad (3.12)$$

У таблицях 3.4-3.11 наведені значення інформаційної ємності найквістового елемента  $I_H$  при значеннях  $m \in (4 \div 15)$ ;  $i \in (1 \div 8)$ ;  $S \in 2 \div 20$ .

Таблиця 3.4 – Значення інформаційної ємності найквістового елемента при  $m \in (4 \div 15)$ ,  $S \in 2 \div 20$ ,  $i = 1$ .

$i$	$S$	$m$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	2	$I_H$	0,702	0,634	0,577	0,529	0,488	0,454	0,425	0,399	0,377	0,357	0,340	0,324
	3	$I_H$	0,830	0,740	0,667	0,607	0,557	0,516	0,481	0,450	0,424	0,401	0,380	0,362
	4	$I_H$	0,925	0,817	0,732	0,663	0,607	0,560	0,521	0,487	0,458	0,432	0,409	0,389
	5	$I_H$	1,000	0,878	0,783	0,708	0,646	0,595	0,552	0,516	0,484	0,456	0,432	0,410
	6	$I_H$	1,062	0,929	0,826	0,744	0,678	0,624	0,578	0,539	0,506	0,476	0,450	0,427
	7	$I_H$	1,115	0,972	0,862	0,775	0,705	0,648	0,600	0,559	0,524	0,493	0,466	0,442
	8	$I_H$	1,161	1,009	0,893	0,802	0,729	0,669	0,619	0,576	0,540	0,508	0,480	0,455
	9	$I_H$	1,202	1,042	0,921	0,826	0,750	0,688	0,636	0,592	0,554	0,521	0,492	0,466

## Продовження таблиці 3.4

1	10	$I_H$	1,239	1,072	0,945	0,847	0,769	0,704	0,651	0,605	0,566	0,532	0,502	0,476
	11	$I_H$	1,272	1,098	0,968	0,867	0,786	0,720	0,664	0,618	0,578	0,543	0,512	0,485
	12	$I_H$	1,302	1,123	0,988	0,884	0,801	0,733	0,677	0,629	0,588	0,552	0,521	0,493
	13	$I_H$	1,330	1,146	1,007	0,901	0,815	0,746	0,688	0,639	0,597	0,561	0,529	0,501
	14	$I_H$	1,357	1,167	1,025	0,916	0,829	0,758	0,699	0,649	0,606	0,569	0,537	0,508
	15	$I_H$	1,381	1,186	1,041	0,930	0,841	0,769	0,709	0,658	0,615	0,577	0,544	0,515
	16	$I_H$	1,404	1,204	1,057	0,943	0,853	0,779	0,718	0,666	0,622	0,584	0,551	0,521
	17	$I_H$	1,425	1,222	1,071	0,955	0,863	0,789	0,727	0,674	0,630	0,591	0,557	0,527
	18	$I_H$	1,445	1,238	1,085	0,967	0,874	0,798	0,735	0,682	0,636	0,597	0,563	0,532
	19	$I_H$	1,464	1,253	1,097	0,978	0,883	0,806	0,743	0,689	0,643	0,603	0,568	0,537
20	$I_H$	1,483	1,268	1,110	0,988	0,892	0,815	0,750	0,696	0,649	0,609	0,573	0,542	

Таблиця 3.5 – Значення інформаційної ємності найквістового елемента при  $m \in (4 \div 15)$ ,  $S \in 2 \div 20$ ,  $i = 2$ .

$i$	$S$	$m$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2	2	$I_H$	0,977	0,961	0,915	0,863	0,813	0,767	0,726	0,688	0,654	0,624	0,596	0,571
	3	$I_H$	1,202	1,156	1,085	1,012	0,946	0,887	0,834	0,788	0,746	0,709	0,676	0,645
	4	$I_H$	1,373	1,302	1,210	1,122	1,043	0,974	0,913	0,860	0,812	0,770	0,733	0,699
	5	$I_H$	1,511	1,417	1,309	1,208	1,119	1,042	0,975	0,916	0,864	0,818	0,777	0,741
	6	$I_H$	1,627	1,514	1,391	1,279	1,182	1,098	1,026	0,963	0,907	0,858	0,814	0,775
	7	$I_H$	1,727	1,597	1,461	1,340	1,236	1,146	1,069	1,002	0,943	0,891	0,845	0,804
	8	$I_H$	1,814	1,669	1,522	1,393	1,282	1,188	1,107	1,036	0,975	0,921	0,872	0,829
	9	$I_H$	1,892	1,733	1,576	1,440	1,324	1,225	1,140	1,067	1,003	0,946	0,896	0,852
	10	$I_H$	1,963	1,791	1,625	1,482	1,361	1,258	1,170	1,094	1,028	0,969	0,918	0,872
	11	$I_H$	2,027	1,843	1,669	1,520	1,394	1,288	1,197	1,118	1,050	0,990	0,937	0,890
	12	$I_H$	2,086	1,891	1,710	1,555	1,425	1,315	1,221	1,141	1,071	1,009	0,955	0,907
	13	$I_H$	2,141	1,936	1,747	1,587	1,453	1,340	1,244	1,162	1,090	1,027	0,971	0,922
	14	$I_H$	2,191	1,977	1,782	1,617	1,479	1,364	1,265	1,181	1,107	1,043	0,986	0,936
	15	$I_H$	2,239	2,016	1,814	1,645	1,504	1,385	1,285	1,199	1,124	1,058	1,002	0,949
	16	$I_H$	2,283	2,052	1,844	1,671	1,527	1,406	1,303	1,215	1,139	1,072	1,015	0,962
	17	$I_H$	2,325	2,086	1,873	1,696	1,548	1,425	1,321	1,231	1,153	1,086	1,027	0,973
	18	$I_H$	2,364	2,118	1,900	1,719	1,569	1,443	1,337	1,246	1,169	1,098	1,038	0,984
	19	$I_H$	2,402	2,148	1,925	1,741	1,588	1,460	1,352	1,259	1,180	1,110	1,049	0,994
	20	$I_H$	2,437	2,177	1,950	1,762	1,606	1,477	1,367	1,273	1,192	1,122	1,060	1,004

Таблиця 3.6 – Значення інформаційної ємності найквістового елемента при  $m \in (4 \div 15)$ ,  $S \in 2 \div 20$ ,  $i = 3$ .

$i$	$S$	$m$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	2	$I_H$	0,830	1,026	1,065	1,052	1,020	0,981	0,941	0,902	0,865	0,830	0,798	0,768
	3	$I_H$	1,080	1,278	1,297	1,261	1,209	1,153	1,098	1,047	0,999	0,955	0,914	0,877
	4	$I_H$	1,282	1,473	1,472	1,417	1,349	1,279	1,213	1,152	1,096	1,045	0,999	0,956
	5	$I_H$	1,452	1,632	1,612	1,541	1,460	1,379	1,304	1,236	1,173	1,117	1,065	1,018
	6	$I_H$	1,598	1,766	1,730	1,645	1,552	1,462	1,379	1,304	1,236	1,175	1,120	1,070
	7	$I_H$	1,727	1,882	1,830	1,733	1,630	1,533	1,443	1,363	1,290	1,225	1,166	1,113
	8	$I_H$	1,842	1,984	1,919	1,811	1,699	1,594	1,499	1,413	1,337	1,268	1,206	1,151
	9	$I_H$	1,945	2,075	1,998	1,880	1,760	1,649	1,548	1,458	1,378	1,307	1,242	1,184
	10	$I_H$	2,040	2,158	2,069	1,942	1,814	1,697	1,592	1,499	1,415	1,341	1,274	1,214
	11	$I_H$	2,127	2,233	2,134	1,998	1,864	1,742	1,633	1,535	1,449	1,372	1,303	1,241
	12	$I_H$	2,207	2,303	2,193	2,049	1,910	1,783	1,669	1,569	1,480	1,401	1,330	1,266
	13	$I_H$	2,282	2,367	2,248	2,097	1,952	1,820	1,703	1,600	1,508	1,427	1,354	1,288
	14	$I_H$	2,352	2,427	2,299	2,141	1,991	1,855	1,735	1,629	1,535	1,451	1,377	1,310
	15	$I_H$	2,418	2,483	2,346	2,182	2,027	1,887	1,764	1,655	1,559	1,474	1,398	1,329
	16	$I_H$	2,480	2,535	2,391	2,221	2,061	1,918	1,791	1,680	1,582	1,495	1,417	1,347
	17	$I_H$	2,539	2,585	2,433	2,258	2,093	1,946	1,817	1,704	1,604	1,515	1,436	1,365
	18	$I_H$	2,594	2,632	2,473	2,292	2,123	1,973	1,841	1,726	1,624	1,534	1,453	1,382
	19	$I_H$	2,647	2,676	2,510	2,324	2,152	1,999	1,865	1,747	1,643	1,552	1,470	1,397
	20	$I_H$	2,698	2,718	2,546	2,355	2,179	2,023	1,886	1,767	1,661	1,569	1,486	1,411

Таблиця 3.7 – Значення інформаційної ємності найквістового елемента при  $m \in (4 \div 15)$ ,  $S \in 2 \div 20$ ,  $i = 4$ .

$i$	$S$	$m$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
4	2	$I_H$	0	0,781	1,022	1,102	1,119	1,107	1,083	1,053	1,020	0,987	0,955	0,925
	3	$I_H$	0	1,026	1,286	1,355	1,354	1,324	1,284	1,239	1,193	1,149	1,107	1,067
	4	$I_H$	0	1,226	1,492	1,547	1,530	1,486	1,432	1,376	1,321	1,268	1,218	1,171
	5	$I_H$	0	1,395	1,661	1,703	1,672	1,615	1,550	1,484	1,421	1,361	1,305	1,253
	6	$I_H$	0	1,543	1,805	1,834	1,790	1,722	1,648	1,574	1,504	1,438	1,377	1,320
	7	$I_H$	0	1,673	1,930	1,947	1,892	1,814	1,732	1,651	1,575	1,504	1,438	1,378
	8	$I_H$	0	1,790	2,040	2,046	1,981	1,895	1,805	1,718	1,636	1,561	1,491	1,428
	9	$I_H$	0	1,896	2,139	2,134	2,060	1,966	1,869	1,777	1,691	1,611	1,539	1,472
	10	$I_H$	0	1,993	2,229	2,214	2,131	2,030	1,928	1,830	1,740	1,657	1,581	1,511
	11	$I_H$	0	2,083	2,311	2,287	2,196	2,088	1,981	1,879	1,784	1,698	1,619	1,547
	12	$I_H$	0	2,166	2,387	2,354	2,256	2,142	2,029	1,923	1,825	1,736	1,654	1,580

## Продовження таблиці 3.7

4	13	$I_H$	0	2,243	2,457	2,416	2,311	2,191	2,074	1,964	1,863	1,771	1,687	1,610
	14	$I_H$	0	2,316	2,522	2,474	2,362	2,237	2,115	2,002	1,898	1,803	1,717	1,638
	15	$I_H$	0	2,384	2,584	2,528	2,410	2,280	2,154	2,037	1,930	1,833	1,745	1,664
	16	$I_H$	0	2,448	2,641	2,578	2,454	2,320	2,190	2,070	1,961	1,861	1,771	1,689
	17	$I_H$	0	2,509	2,695	2,626	2,497	2,358	2,224	2,101	1,989	1,888	1,795	1,712
	18	$I_H$	0	2,567	2,747	2,671	2,536	2,393	2,257	2,131	2,016	1,913	1,819	1,734
	19	$I_H$	0	2,622	2,795	2,713	2,574	2,427	2,287	2,158	2,042	1,936	1,841	1,754
	20	$I_H$	0	2,675	2,842	2,754	2,610	2,459	2,316	2,185	2,066	1,959	1,861	1,774

Таблиця 3.8 – Значення інформаційної ємності найквістового елемента при  $m \in (4 \div 15)$ ,  $S \in 2 \div 20$ ,  $i = 5$ .

$i$	$S$	$m$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
5	2	$I_H$	0	0	0,732	0,997	1,106	1,148	1,155	1,145	1,125	1,101	1,074	1,046
	3	$I_H$	0	0	0,968	1,265	1,371	1,399	1,392	1,367	1,334	1,297	1,259	1,221
	4	$I_H$	0	0	1,163	1,476	1,574	1,590	1,570	1,533	1,488	1,441	1,394	1,348
	5	$I_H$	0	0	1,330	1,650	1,740	1,744	1,712	1,664	1,611	1,555	1,501	1,449
	6	$I_H$	0	0	1,475	1,799	1,880	1,873	1,831	1,774	1,712	1,650	1,590	1,532
	7	$I_H$	0	0	1,605	1,929	2,001	1,984	1,933	1,868	1,799	1,731	1,665	1,603
	8	$I_H$	0	0	1,722	2,045	2,107	2,082	2,022	1,950	1,875	1,802	1,731	1,664
	9	$I_H$	0	0	1,828	2,148	2,202	2,168	2,101	2,023	1,943	1,864	1,790	1,719
	10	$I_H$	0	0	1,925	2,242	2,289	2,247	2,173	2,089	2,003	1,921	1,842	1,768
	11	$I_H$	0	0	2,015	2,329	2,367	2,318	2,238	2,149	2,058	1,972	1,890	1,813
	12	$I_H$	0	0	2,099	2,408	2,439	2,384	2,298	2,203	2,109	2,018	1,933	1,854
	13	$I_H$	0	0	2,177	2,482	2,506	2,444	2,353	2,254	2,155	2,062	1,973	1,891
	14	$I_H$	0	0	2,251	2,551	2,569	2,500	2,404	2,301	2,199	2,102	2,011	1,926
	15	$I_H$	0	0	2,320	2,615	2,627	2,553	2,452	2,344	2,239	2,139	2,045	1,959
	16	$I_H$	0	0	2,385	2,676	2,682	2,602	2,497	2,385	2,277	2,174	2,078	1,989
	17	$I_H$	0	0	2,447	2,734	2,733	2,649	2,539	2,424	2,312	2,207	2,109	2,017
	18	$I_H$	0	0	2,506	2,788	2,782	2,693	2,579	2,460	2,346	2,238	2,138	2,044
	19	$I_H$	0	0	2,563	2,840	2,828	2,735	2,617	2,495	2,378	2,267	2,165	2,070
	20	$I_H$	0	0	2,616	2,889	2,872	2,774	2,652	2,528	2,408	2,295	2,190	2,095

Таблиця 3.9 – Значення інформаційної ємності найквістового елемента при  $m \in (4 \div 15)$ ,  $S \in 2 \div 20$ ,  $i = 6$ .

$i$	$S$	$m$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
6	2	$I_H$	0	0	0	0,687	0,964	1,095	1,155	1,179	1,182	1,172	1,156	1,136
	3	$I_H$	0	0	0	0,913	1,231	1,365	1,418	1,430	1,420	1,398	1,370	1,339
	4	$I_H$	0	0	0	1,102	1,444	1,576	1,619	1,619	1,598	1,566	1,528	1,488
	5	$I_H$	0	0	0	1,265	1,621	1,748	1,781	1,772	1,741	1,700	1,654	1,607
	6	$I_H$	0	0	0	1,407	1,773	1,893	1,918	1,899	1,860	1,811	1,759	1,705
	7	$I_H$	0	0	0	1,535	1,905	2,019	2,036	2,009	1,962	1,907	1,848	1,789
	8	$I_H$	0	0	0	1,650	2,023	2,131	2,140	2,105	2,052	1,990	1,926	1,862
	9	$I_H$	0	0	0	1,756	2,130	2,231	2,232	2,191	2,131	2,064	1,996	1,927
	10	$I_H$	0	0	0	1,852	2,227	2,321	2,316	2,268	2,203	2,131	2,058	1,986
	11	$I_H$	0	0	0	1,942	2,315	2,404	2,392	2,339	2,268	2,192	2,114	2,039
	12	$I_H$	0	0	0	2,026	2,397	2,480	2,462	2,403	2,328	2,247	2,166	2,088
	13	$I_H$	0	0	0	2,104	2,474	2,551	2,527	2,463	2,383	2,298	2,214	2,132
	14	$I_H$	0	0	0	2,177	2,545	2,617	2,587	2,519	2,435	2,346	2,259	2,174
	15	$I_H$	0	0	0	2,247	2,612	2,678	2,644	2,571	2,482	2,390	2,300	2,213
	16	$I_H$	0	0	0	2,312	2,675	2,736	2,696	2,619	2,528	2,432	2,339	2,249
	17	$I_H$	0	0	0	2,375	2,734	2,790	2,746	2,665	2,569	2,471	2,375	2,283
	18	$I_H$	0	0	0	2,434	2,790	2,842	2,794	2,708	2,610	2,508	2,410	2,315
	19	$I_H$	0	0	0	2,491	2,844	2,891	2,838	2,749	2,647	2,543	2,442	2,346
	20	$I_H$	0	0	0	2,545	2,895	2,937	2,881	2,788	2,683	2,576	2,473	2,375

Таблиця 3.10 – Значення інформаційної ємності найквістового елемента при  $m \in (4 \div 15)$ ,  $S \in 2 \div 20$ ,  $i = 7$ .

$i$	$S$	$m$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
7	2	$I_H$	0	0	0	0	0,646	0,930	1,074	1,150	1,187	1,202	1,202	1,194
	3	$I_H$	0	0	0	0	0,863	1,194	1,348	1,420	1,448	1,452	1,441	1,422
	4	$I_H$	0	0	0	0	1,046	1,406	1,562	1,628	1,647	1,640	1,620	1,592
	5	$I_H$	0	0	0	0	1,204	1,583	1,738	1,796	1,807	1,792	1,763	1,727
	6	$I_H$	0	0	0	0	1,343	1,736	1,887	1,939	1,941	1,919	1,883	1,840
	7	$I_H$	0	0	0	0	1,468	1,870	2,018	2,062	2,057	2,027	1,985	1,936
	8	$I_H$	0	0	0	0	1,581	1,989	2,133	2,170	2,159	2,123	2,074	2,021
	9	$I_H$	0	0	0	0	1,685	2,097	2,236	2,267	2,250	2,208	2,154	2,096
	10	$I_H$	0	0	0	0	1,781	2,196	2,330	2,355	2,331	2,284	2,226	2,163
	11	$I_H$	0	0	0	0	1,870	2,286	2,415	2,435	2,406	2,354	2,291	2,225
	12	$I_H$	0	0	0	0	1,953	2,370	2,494	2,509	2,475	2,418	2,351	2,280

Продовження таблиці 3.10

7	13	$I_H$	0	0	0	0	2,030	2,447	2,567	2,577	2,538	2,477	2,406	2,332
	14	$I_H$	0	0	0	0	2,103	2,520	2,636	2,640	2,597	2,532	2,458	2,380
	15	$I_H$	0	0	0	0	2,172	2,588	2,700	2,700	2,652	2,583	2,505	2,425
	16	$I_H$	0	0	0	0	2,238	2,653	2,760	2,755	2,704	2,631	2,550	2,467
	17	$I_H$	0	0	0	0	2,300	2,714	2,817	2,808	2,752	2,677	2,593	2,507
	18	$I_H$	0	0	0	0	2,359	2,771	2,870	2,858	2,798	2,719	2,632	2,544
	19	$I_H$	0	0	0	0	2,416	2,826	2,921	2,905	2,842	2,760	2,671	2,580
	20	$I_H$	0	0	0	0	2,470	2,878	2,970	2,949	2,884	2,798	2,707	2,614

Таблиця 3.11 – Значення інформаційної ємності найквістового елемента при  $m \in (4 \div 15)$ ,  $S \in 2 \div 20$ ,  $i = 8$ .

$i$	$S$	$m$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
8	2	$I_H$	0	0	0	0	0	0,610	0,895	1,050	1,138	1,186	1,210	1,219
	3	$I_H$	0	0	0	0	0	0,818	1,155	1,324	1,412	1,454	1,470	1,469
	4	$I_H$	0	0	0	0	0	0,995	1,365	1,540	1,624	1,659	1,666	1,657
	5	$I_H$	0	0	0	0	0	1,148	1,542	1,718	1,797	1,825	1,825	1,807
	6	$I_H$	0	0	0	0	0	1,284	1,694	1,870	1,944	1,965	1,957	1,933
	7	$I_H$	0	0	0	0	0	1,406	1,829	2,003	2,071	2,085	2,071	2,041
	8	$I_H$	0	0	0	0	0	1,517	1,949	2,121	2,183	2,192	2,172	2,136
	9	$I_H$	0	0	0	0	0	1,619	2,058	2,226	2,283	2,286	2,261	2,220
	10	$I_H$	0	0	0	0	0	1,713	2,157	2,322	2,374	2,372	2,342	2,296
	11	$I_H$	0	0	0	0	0	1,801	2,248	2,410	2,457	2,450	2,415	2,366
	12	$I_H$	0	0	0	0	0	1,883	2,333	2,491	2,534	2,522	2,483	2,429
	13	$I_H$	0	0	0	0	0	1,959	2,411	2,566	2,604	2,588	2,545	2,488
	14	$I_H$	0	0	0	0	0	2,032	2,485	2,636	2,670	2,650	2,603	2,542
	15	$I_H$	0	0	0	0	0	2,100	2,554	2,702	2,732	2,707	2,657	2,593
	16	$I_H$	0	0	0	0	0	2,165	2,620	2,764	2,790	2,762	2,708	2,641
	17	$I_H$	0	0	0	0	0	2,227	2,681	2,823	2,845	2,813	2,755	2,686
	18	$I_H$	0	0	0	0	0	2,286	2,740	2,878	2,896	2,861	2,801	2,728
	19	$I_H$	0	0	0	0	0	2,342	2,796	2,930	2,945	2,907	2,843	2,769
	20	$I_H$	0	0	0	0	0	2,396	2,849	2,980	2,992	2,951	2,884	2,807

На рисунках 3.6; 3.7; 3.8; 3.9 представлені залежності ємності найквістового елемента від  $m$  та  $i$ , які розраховані для  $s = 3$ ,  $s = 6$ ,  $s = 9$ ,  $s = 11$ .

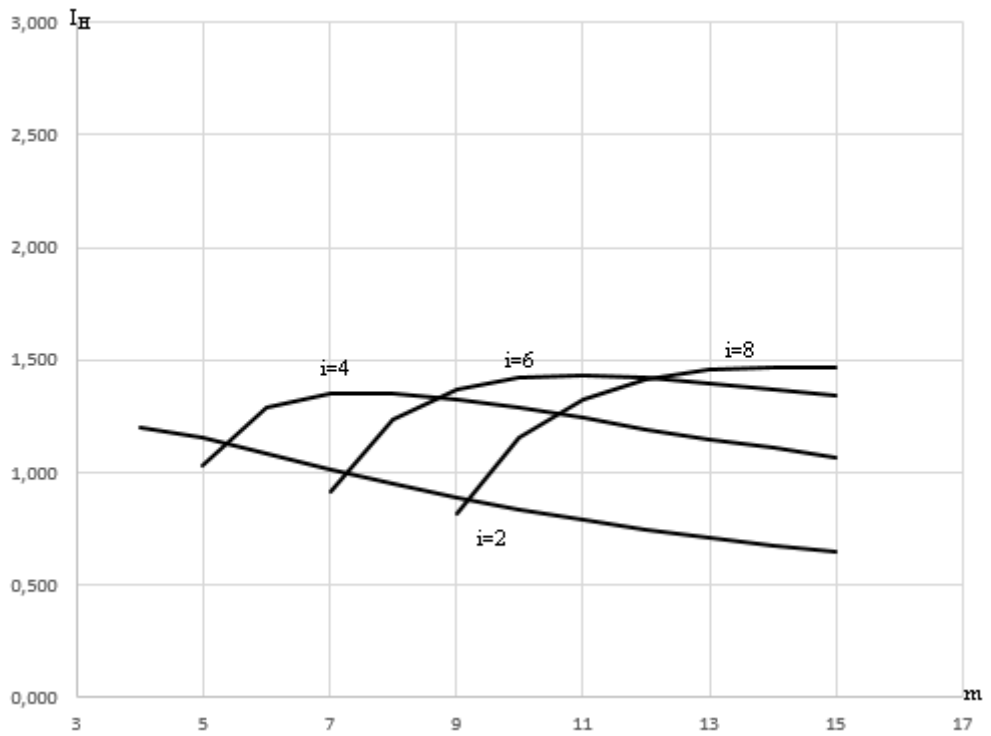


Рисунок 3.6 – Залежність інформаційної ємності від довжини  $m$  ТСК при  $s = 3$

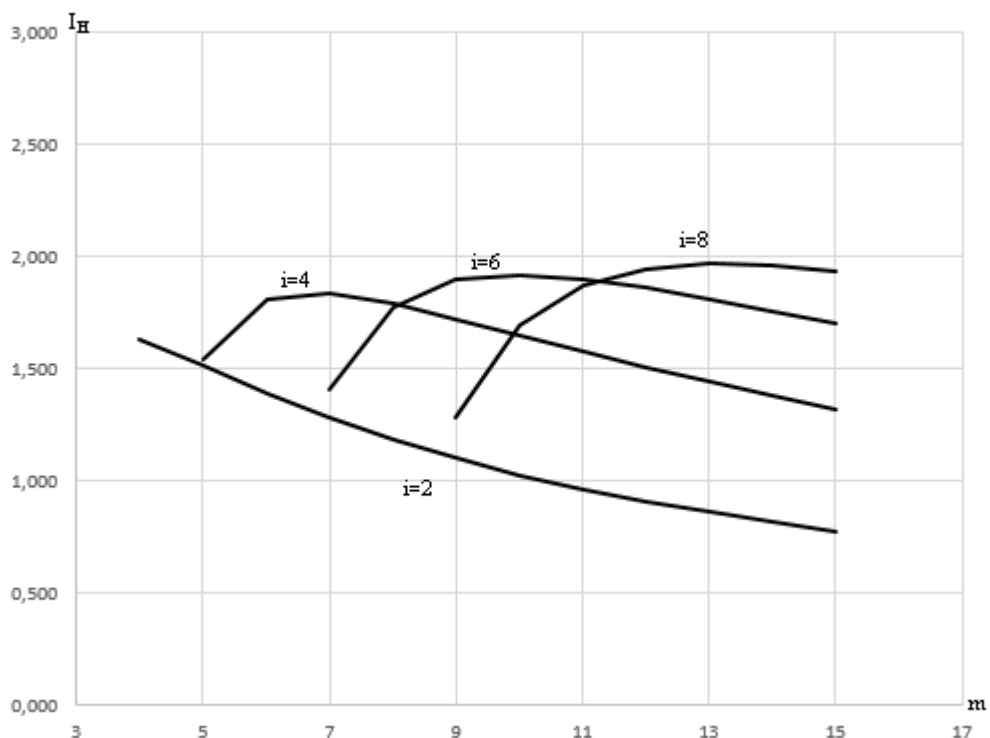


Рисунок 3.7 – Залежність інформаційної ємності від довжини  $m$  ТСК при  $s = 6$

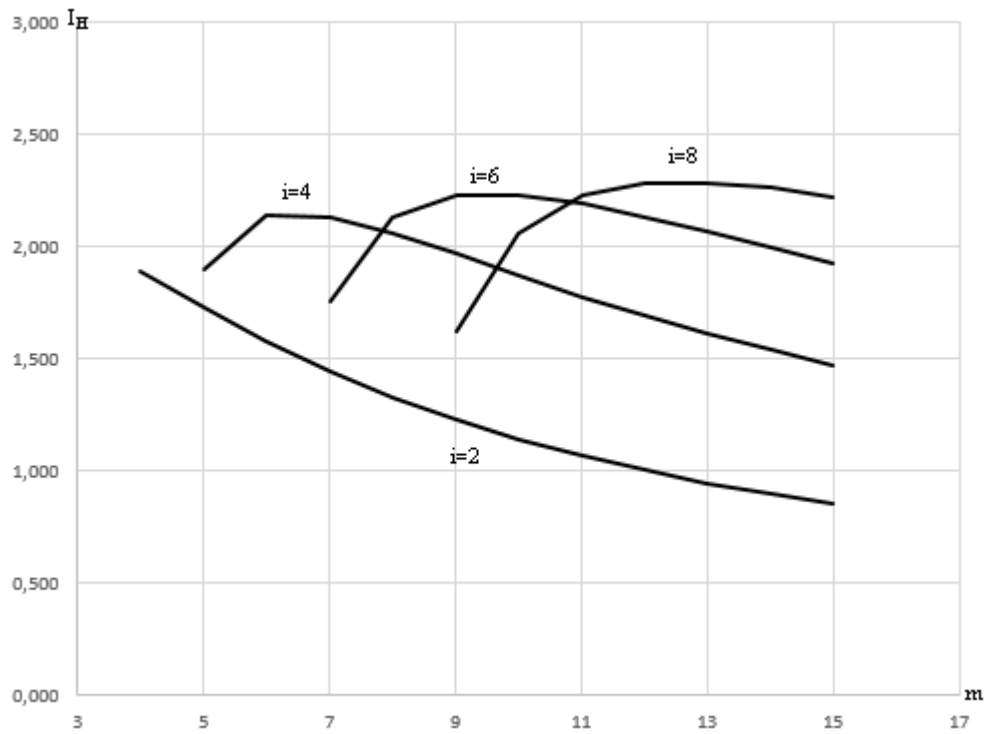


Рисунок 3.8 – Залежність інформаційної ємності від довжини  $m$  ТСК при  $s = 9$

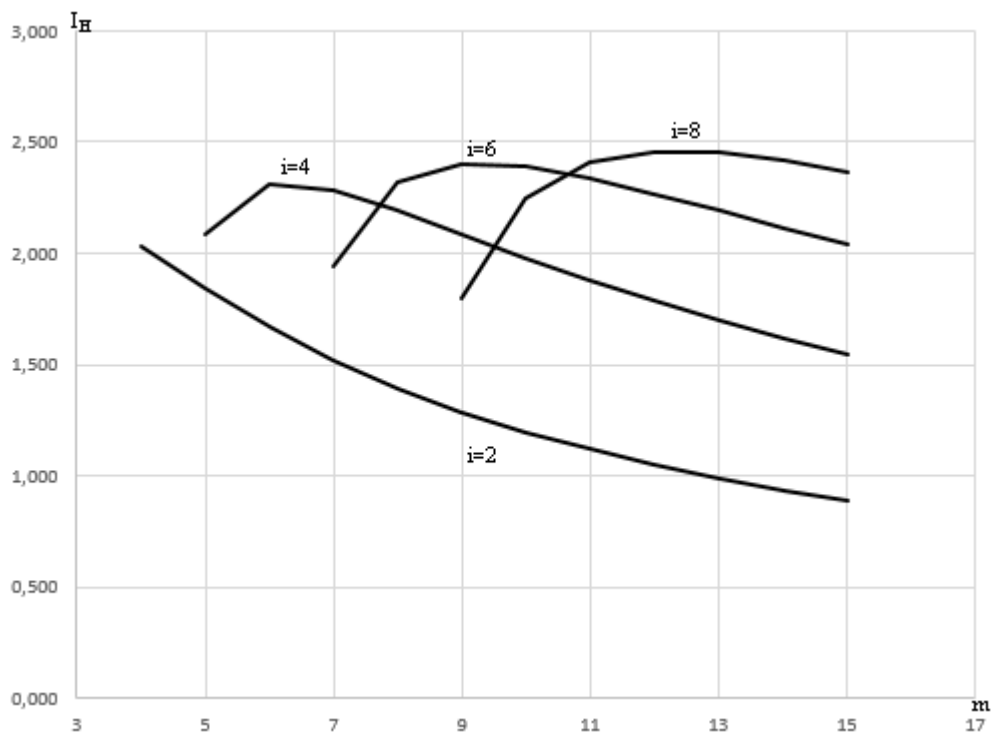


Рисунок 3.9 – Залежність інформаційної ємності від довжини  $m$  ТСК при  $s = 11$

Ентропія кодового слова (кодової конструкції) визначається [2]:

$$H = \log_2 N_p. \quad (3.13)$$

Інформаційна ємність одного найквістового елемента:  $I_H = \frac{H}{m}$ .

У таблицях 3.12 – 3.19 наведені значення ентропії  $H$  кодових слів при тривалостях  $m$  ( $m \in 4 \div 15$ ) для  $i \in 1 \div 8$  та  $S$  ( $S=3,5,7,9,11,13,15,17,19$ ).

Таблиця 3.12 – Значення ентропії кодових слів при тривалостях  $m$  ( $m \in 4 \div 15$ ) для  $i = 1$  та  $S$  ( $S=3,5,7,9,11,13,15,17,19$ ).

$i$	$S$	$m$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	3	$N_{PT}$	3,322	3,700	4,000	4,248	4,459	4,644	4,807	4,954	5,087	5,209	5,322	5,426
	5	$N_{PT}$	4,000	4,392	4,700	4,954	5,170	5,358	5,524	5,672	5,807	5,931	6,044	6,150
	7	$N_{PT}$	4,459	4,858	5,170	5,426	5,644	5,833	6,000	6,150	6,285	6,409	6,524	6,629
	9	$N_{PT}$	4,807	5,209	5,524	5,781	6,000	6,190	6,358	6,508	6,644	6,768	6,883	6,989
	11	$N_{PT}$	5,087	5,492	5,807	6,066	6,285	6,476	6,644	6,794	6,931	7,055	7,170	7,276
	13	$N_{PT}$	5,322	5,728	6,044	6,304	6,524	6,714	6,883	7,033	7,170	7,295	7,409	7,516
	15	$N_{PT}$	5,524	5,931	6,248	6,508	6,728	6,919	7,087	7,238	7,375	7,500	7,615	7,721
	17	$N_{PT}$	5,700	6,109	6,426	6,687	6,907	7,098	7,267	7,418	7,555	7,679	7,794	7,901
19	$N_{PT}$	5,858	6,267	6,585	6,845	7,066	7,257	7,426	7,577	7,714	7,839	7,954	8,061	

Таблиця 3.13 – Значення ентропії кодових слів при тривалостях  $m$  ( $m \in 4 \div 15$ ) для  $i = 2$  та  $S$  ( $S=3,5,7,9,11,13,15,17,19$ ).

$i$	$S$	$m$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2	3	$N_{PT}$	4,807	5,781	6,508	7,087	7,570	7,983	8,344	8,665	8,954	9,217	9,457	9,679
	5	$N_{PT}$	6,044	7,087	7,852	8,455	8,954	9,379	9,750	10,07	10,37	10,64	10,88	11,11
	7	$N_{PT}$	6,907	7,983	8,765	9,379	9,886	10,31	10,69	11,02	11,32	11,58	11,83	12,06
	9	$N_{PT}$	7,570	8,665	9,457	10,07	10,58	11,02	11,39	11,73	12,03	12,30	12,55	12,77
	11	$N_{PT}$	8,109	9,217	10,01	10,64	11,15	11,58	11,96	12,30	12,60	12,87	13,12	13,35
	13	$N_{PT}$	8,562	9,679	10,48	11,11	11,62	12,06	12,44	12,77	13,07	13,35	13,59	13,82
	15	$N_{PT}$	8,954	10,07	10,88	11,51	12,03	12,46	12,85	13,18	13,48	13,75	14,02	14,23
	17	$N_{PT}$	9,299	10,42	11,23	11,86	12,38	12,82	13,20	13,54	13,84	14,12	14,37	14,59
19	$N_{PT}$	9,607	10,74	11,55	12,18	12,70	13,14	13,52	13,85	14,16	14,43	14,68	14,91	

Таблиця 3.14 – Значення ентропії кодових слів при тривалостях  $m$  ( $m \in 4 \div 15$ ) для  $i = 3$  та  $S$  ( $S=3,5,7,9,11,13,15,17,19$ ).

$i$	$S$	$m$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	3	$N_{PT}$	4,32	6,39	7,78	8,83	9,67	10,37	10,98	11,51	11,98	12,41	12,80	13,15
	5	$N_{PT}$	5,80	8,16	9,67	10,79	11,67	12,41	13,04	13,59	14,07	14,51	14,91	15,27
	7	$N_{PT}$	6,90	9,40	10,98	12,13	13,04	13,79	14,43	14,98	15,48	15,92	16,32	16,69
	9	$N_{PT}$	7,78	10,37	11,98	13,15	14,07	14,83	15,48	16,04	16,54	16,98	17,39	17,75
	11	$N_{PT}$	8,50	11,16	12,80	13,98	14,91	15,67	16,32	16,89	17,39	17,83	18,24	18,61
	13	$N_{PT}$	9,12	11,83	13,48	14,67	15,61	16,38	17,03	17,59	18,09	18,54	18,95	19,32
	15	$N_{PT}$	9,67	12,41	14,07	15,27	16,21	16,98	17,63	18,20	18,70	19,15	19,56	19,93
	17	$N_{PT}$	10,15	12,92	14,59	15,80	16,74	17,51	18,17	18,74	19,24	19,69	20,10	20,48
19	$N_{PT}$	10,58	13,38	15,06	16,27	17,21	17,98	18,64	19,21	19,71	20,17	20,57	20,95	

Таблиця 3.15 – Значення ентропії кодових слів при тривалостях  $m$  ( $m \in 4 \div 15$ ) для  $i = 4$  та  $S$  ( $S=3,5,7,9,11,13,15,17,19$ ).

$i$	$S$	$m$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
4	3	$N_{PT}$	0	5,13	7,71	9,48	10,83	11,92	12,84	13,63	14,32	14,94	15,50	16,01
	5	$N_{PT}$	0	6,98	9,97	11,92	13,38	14,54	15,50	16,33	17,05	17,69	18,27	18,80
	7	$N_{PT}$	0	8,37	11,58	13,63	15,13	16,33	17,32	18,16	18,90	19,55	20,13	20,67
	9	$N_{PT}$	0	9,48	12,84	14,94	16,48	17,69	18,69	19,55	20,29	20,95	21,54	22,08
	11	$N_{PT}$	0	10,41	13,87	16,01	17,57	18,80	19,81	20,67	21,41	22,08	22,67	23,21
	13	$N_{PT}$	0	11,22	14,74	16,91	18,49	19,72	20,74	21,60	22,35	23,02	23,61	24,15
	15	$N_{PT}$	0	11,92	15,50	17,69	19,28	20,52	21,54	22,41	23,16	23,83	24,43	24,97
	17	$N_{PT}$	0	12,55	16,17	18,38	19,97	21,22	22,24	23,11	23,87	24,54	25,13	25,68
19	$N_{PT}$	0	13,11	16,77	18,99	20,59	21,84	22,87	23,74	24,50	25,17	25,77	26,32	

Таблиця 3.16 – Значення ентропії кодових слів при тривалостях  $m$  ( $m \in 4 \div 15$ ) для  $i = 5$  та  $S$  ( $S=3,5,7,9,11,13,15,17,19$ ).

$i$	$S$	$m$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
5	3	$N_{PT}$	0	0	5,81	8,85	10,97	12,60	13,92	15,04	16,01	16,86	17,62	18,31
	5	$N_{PT}$	0	0	7,98	11,55	13,92	15,70	17,12	18,31	19,33	20,22	21,01	21,73
	7	$N_{PT}$	0	0	9,63	13,51	16,01	17,86	19,33	20,55	21,59	22,50	23,31	24,04
	9	$N_{PT}$	0	0	10,97	15,04	17,62	19,52	21,01	22,26	23,31	24,24	25,05	25,79
	11	$N_{PT}$	0	0	12,09	16,30	18,94	20,86	22,38	23,63	24,70	25,63	26,45	27,19
	13	$N_{PT}$	0	0	13,06	17,37	20,05	22,00	23,53	24,79	25,87	26,80	27,63	28,37
	15	$N_{PT}$	0	0	13,92	18,31	21,01	22,98	24,52	25,79	26,86	27,81	28,64	29,38
	17	$N_{PT}$	0	0	14,68	19,14	21,87	23,84	25,39	26,66	27,75	28,69	29,52	30,25
19	$N_{PT}$	0	0	15,38	19,88	22,63	24,61	26,17	27,45	28,53	29,47	30,31	31,05	

Таблиця 3.17 – Значення ентропії кодових слів при тривалостях  $m$  ( $m \in 4 \div 15$ ) для  $i = 6$  та  $S$  ( $S=3,5,7,9,11,13,15,17,19$ ).

$i$	$S$	$m$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
6	3	$N_{PT}$	0	0	0	6,39	9,85	12,29	14,18	15,73	17,04	18,18	19,18	20,08
	5	$N_{PT}$	0	0	0	8,85	12,97	15,73	17,81	19,49	20,89	22,10	23,16	24,10
	7	$N_{PT}$	0	0	0	10,74	15,24	18,18	20,36	22,10	23,55	24,79	25,87	26,84
	9	$N_{PT}$	0	0	0	12,29	17,04	20,08	22,32	24,10	25,58	26,84	27,94	28,91
	11	$N_{PT}$	0	0	0	13,60	18,52	21,64	23,92	25,73	27,22	28,49	29,60	30,58
	13	$N_{PT}$	0	0	0	14,73	19,79	22,96	25,27	27,09	28,60	29,88	30,99	31,98
	15	$N_{PT}$	0	0	0	15,73	20,89	24,10	26,44	28,28	29,79	31,07	32,20	33,19
	17	$N_{PT}$	0	0	0	16,62	21,87	25,11	27,46	29,31	30,83	32,13	33,25	34,25
19	$N_{PT}$	0	0	0	17,43	22,75	26,02	28,38	30,24	31,77	33,06	34,19	35,19	

Таблиця 3.18 – Значення ентропії кодових слів при тривалостях  $m$  ( $m \in 4 \div 15$ ) для  $i = 7$  та  $S$  ( $S=3,5,7,9,11,13,15,17,19$ ).

$i$	$S$	$m$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
7	3	$N_{PT}$	0	0	0	0	6,91	10,74	13,48	15,62	17,38	18,87	20,18	21,33
	5	$N_{PT}$	0	0	0	0	9,63	14,25	17,38	19,76	21,68	23,30	24,69	25,91
	7	$N_{PT}$	0	0	0	0	11,74	16,83	20,18	22,68	24,69	26,36	27,79	29,04
	9	$N_{PT}$	0	0	0	0	13,48	18,87	22,36	24,94	27,00	28,70	30,16	31,43
	11	$N_{PT}$	0	0	0	0	14,96	20,57	24,15	26,79	28,87	30,60	32,08	33,37
	13	$N_{PT}$	0	0	0	0	16,24	22,03	25,67	28,35	30,45	32,20	33,68	34,98
	15	$N_{PT}$	0	0	0	0	17,38	23,30	27,00	29,70	31,82	33,58	35,08	36,38
	17	$N_{PT}$	0	0	0	0	18,40	24,42	28,17	30,88	33,03	34,79	36,30	37,60
19	$N_{PT}$	0	0	0	0	19,33	25,44	29,21	31,95	34,11	35,88	37,39	38,70	

Таблиця 3.19 – Значення ентропії кодових слів при тривалостях  $m$  ( $m \in 4 \div 15$ ) для  $i = 8$  та  $S$  ( $S=3,5,7,9,11,13,15,17,19$ ).

$i$	$S$	$m$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
8	3	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	7,37	11,55	14,57	16,94	18,90	20,58	22,03
	5	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	10,33	15,42	18,90	21,57	23,73	25,54	27,11
	7	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	12,65	18,29	22,03	24,85	27,11	29,00	30,62
	9	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	14,57	20,58	24,49	27,40	29,72	31,65	33,30
	11	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	16,21	22,48	26,51	29,49	31,85	33,81	35,49
	13	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	17,63	24,11	28,23	31,25	33,64	35,63	37,32
	15	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	18,90	25,54	29,72	32,78	35,20	37,19	38,90
	17	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	20,04	26,81	31,05	34,14	36,57	38,58	40,29
19	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	21,08	27,96	32,23	35,34	37,79	39,81	41,53	

На рисунку 3.10 представлено графік залежності ентропії кодових слів від тривалості  $m$  при  $S = 9$ .

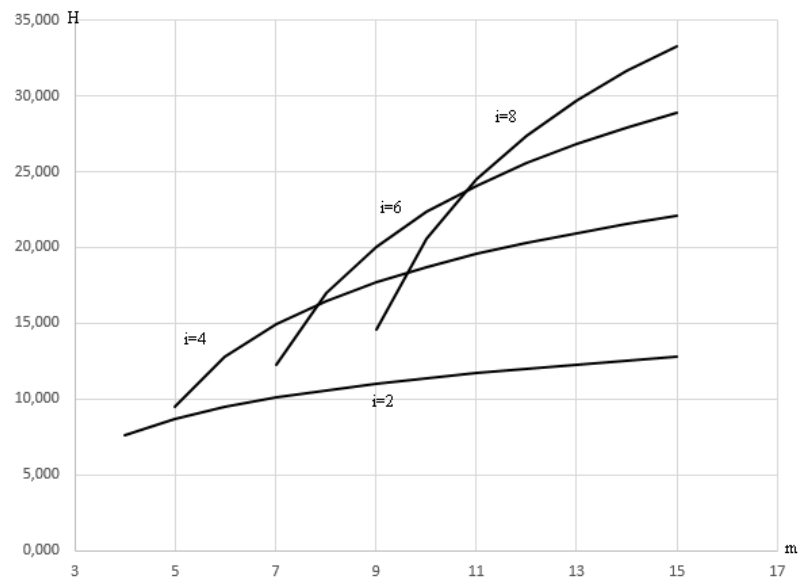


Рисунок 3.10 – Залежність ентропії кодових слів від тривалості  $m$  при  $S = 9$

## Висновки до третього розділу

1. При зростанні швидкості передачі інформації  $R$  відношення сигнал/шум на вході приймача зменшується, в результаті чого зростає ймовірність бітової помилки  $P_b$ . При швидкості  $R = 100$  Мбіт/с при температурі шумів  $T_0 = 284$ К, потужності сигналу на вході приймача  $p_c = -105$  дБВт, відношення сигнал/шум складає  $E_b / N_0 = 10,15$ . При збільшенні швидкості  $R$  з 100 Мбіт/с до 160 Мбіт/с відношення сигнал/шум зменшиться на 37,4% і становитиме  $E_b / N_0 = 6,35$ , а ймовірність бітової помилки  $P_b$  збільшиться з  $0,32 \cdot 10^{-5}$  до  $1,83 \cdot 10^{-4}$ .

2. Зростання рівня потужності сигналу на вході приймача  $p_c$  призводить до збільшення відношення сигнал/шум на вході приймача, в результаті чого ймовірність бітової помилки  $P_b$  зменшується. При потужності сигналу  $p_c = -110$  дБВт при температурі шумів  $T_0 = 285$ К, швидкості передачі інформації  $R = 160$  Мбіт/с, відношення сигнал/шум складає  $E_b / N_0 = 2$ . При збільшенні потужності сигналу  $p_c$  з -110 дБВт до -100 дБВт відношення сигнал/шум зростає на 1 і становитиме 20,01, а ймовірність бітової помилки  $P_b$  зменшиться з  $2,27 \cdot 10^{-2}$  до  $1,25 \cdot 10^{-10}$ .

3. Зростання шумової температури  $T$  зменшує відношення сигнал/шум на вході приймача, в результаті чого зростає ймовірність бітової помилки  $P_b$ . При температурі  $T = 284$  К, потужності сигналу на вході приймача  $p_c = -105$  дБВт, швидкості передачі інформації  $R = 100$  Мбіт/с, відношення сигнал/шум складає  $E_b / N_0 = 10,16$ . При збільшенні температури шумів з 284 К до 309 К відношення сигнал/шум зменшиться на 8,1% і становитиме 9,34, а ймовірність бітової помилки  $P_b$  збільшиться з  $4,71 \cdot 10^{-6}$  до  $7,73 \cdot 10^{-6}$ .

4. При  $i = 5$ ,  $m = 10$ ,  $s = 10$  інформаційна ємність  $I_H = 2,173$  біт на елемент, а при  $s = 9$ ,  $i = 5$ ,  $m = 10$ ,  $I_H = 2,101$  біт на елемент
5. При збільшенні  $S$  з 9 до 12 збільшується інформаційна ємність і зростає число реалізацій  $N_{PT}$  з 2118760 до 8259888.
6. Максимальне значення інформаційної ємності досягається при  $i = 8$ . Якщо  $i = 8$ ,  $m = 12$  при  $s = 20$ , то  $I_H = 2,992$  біт на елемент.

## 4 ЕФЕКТИВНІСТЬ ТСК В КАНАЛАХ ЗВ'ЯЗКУ

### 4.1 Ефективність наднайквістової швидкості модуляції

Як відомо, імпульсна реакція смуго-обмеженого каналу зі смугою пропускання  $(0, \Omega)$  та його передатна функція  $H(\omega)$  пов'язані співвідношенням [2]:

$$h_{\Omega}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\Omega}^{\Omega} H_{\Omega}(\omega) e^{i\omega t} d\omega. \quad (4.1)$$

Якщо на вхід такого каналу подати сигнал, що являє собою  $\delta$ -імпульсну послідовність, то на його виході дістанемо напругу:

$$z(k) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} x_l h_{\Omega}(k-l), \quad k=0; \pm 1; \dots, \quad H(\omega) = \begin{cases} 1 & |\omega| \leq \pi \\ 0 & |\omega| > \pi \end{cases}. \quad (4.2)$$

Отже, сигнал помилки при передаванні корисного сигналу визначається виразом:

$$z(k) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} x_l u(k-l) - \sum_{l=-\infty}^{\infty} x_l h_{\Omega}(k-l) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} x_l [u(k-l) - h_{\Omega}(k-l)]. \quad (4.3)$$

де  $u(k) = \begin{cases} 1, & k=0, \\ 0, & k \neq 0. \end{cases}$  - дискретна імпульсна реакція ідеального фільтра у випадку,

коли інтервал дискретизації дорівнює 1 с.

Відзначимо, що при використанні умови:

$$h_{\Omega}(0) = 1, \quad (4.4)$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\Omega}^{\Omega} H_{\Omega}(\omega) d\omega = 1. \quad (4.5)$$

Останнє співвідношення очевидно виходить із виразів (4.4) та (4.1).

Припустимо, що випадкова інформаційна послідовність  $x(K)$  є стандартною в широкому розумінні і має автокореляційну функцію, чи, точніше, автокореляційну послідовність:

$$B(m) = M \{x_n, x_{n+m}\}, m = 0, \pm 1, \dots, \quad (4.6)$$

де  $M$  – операція усереднення за множиною реалізацій та нульовим математичним сподіванням.

Енергетичний спектр (спектр густини потужності) розглядуваної випадкової залежності дорівнює [2]:

$$P(e^{i\omega}) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} B(m) e^{-i\omega m}, -\pi \leq \omega \leq \pi. \quad (4.7)$$

Відповідно до відомих співвідношень для перетворення енергетичного спектра лінійною системою та формулою (4.3), спектр густини потужності випадкової послідовності:

$$Q(e^{i\omega}) = P(e^{i\omega}) |\sigma(e^{i\omega})|^2. \quad (4.8)$$

Причому, як відомо, спектр відліків імпульсної реакції:

$$H_{\Omega}(e^{i\omega}) = \sum_{p=-\infty}^{\infty} H_{\Omega}(\omega - p2\pi). \quad (4.9)$$

Оскільки дисперсію випадкової послідовності можна знайти діленням на  $2\pi$  її енергетичного спектра, дисперсія міжсимвольної завади, що нас цікавить, обчислюється за допомогою наступного співвідношення, що випливає з рівностей (4.7) та (4.9):

$$\sigma_z^2 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} Q(e^{i\omega}) d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} P(e^{i\omega}) \left[ 1 - \sum_{p=-\infty}^{\infty} H_{\Omega}(\omega - p2\pi) \right]^2 d\omega. \quad (4.10)$$

Оскільки, за припущенням  $H_{\Omega}(\omega) = 0$  при  $\omega > \Omega$  на величину інтеграла в останньому виразі впливає лише один доданок нескінченної суми (при  $p = 0$ ). У зв'язку з чим величину (4.11) можна перетворити до вигляду:

$$\sigma_z^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} P(e^{i\omega}) [1 - H_{\Omega}(\omega)]^2 d\omega. \quad (4.11)$$

З урахуванням парності підінтегрального виразу з формули (4.12) та смугової обмеженості  $H_{\Omega}(\omega)$ , можемо записати остаточно:

$$\sigma_z^2 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} P(e^{i\omega}) [1 - H_{\Omega}(\omega)]^2 d\omega + \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} P(e^{i\omega}) d\omega. \quad (4.12)$$

Оцінимо значення  $\sigma_z^2$  для випадку передавання так званого випадкового телеграфного сигналу, який набуває з однаковою ймовірністю два можливих значення (+1) та (-1) і має функцію автокореляції:

$$B(\tau) = e^{-2\lambda|\tau|}, \quad -\infty < \tau < \infty. \quad (4.13)$$

де  $\lambda_0$  – середнє число перетинів нульового рівня за одиницю часу.

Енергетичний спектр [2]:

$$P(\omega) = \sum_{-\infty}^{\infty} B(\tau) e^{i\omega\tau} d\tau = \frac{4\lambda_0}{4\lambda_0 + \omega^2}; -\infty < \omega < \infty. \quad (4.14)$$

Оскільки кореляційна послідовність відліків випадкового телеграфного сигналу має вигляд  $B(m) = e^{-2\lambda|m|}$ ,  $m = 0, \pm 1, \dots$ , а її дискретне перетворення Фур'є (спектр густини потужності):

$$P(e^{i\omega}) = \sum_{p=-\infty}^{\infty} P(\omega - p2\pi) = \frac{4\lambda_0}{4\lambda_0 + (\omega - p2\pi)^2} \sum_{p=-\infty}^{\infty}, -\pi \leq \omega < \pi. \quad (4.15)$$

Амплітуда міжсимвольної завади визначається [2]:

$$u_{мз} = \sqrt{\sigma_z^2}. \quad (4.16)$$

Величина  $\pi/\Omega = \mu$  показує, у скільки разів швидкість передавання посилок більша за найквістову граничну швидкість для даного каналу.

Результати розрахунків  $\sigma^2$  та  $u_{мз}$  при  $\lambda = 0,4$  наведено нижче:

$m$	1,1	1,2	1,4	1,6
$s_2$	0,04	0,1	0,18	0,42
$u_{мс}$	0,2	0,32	0,42	0,64

Якщо для розглядуваного каналу зв'язку відношення сигнал/завада має певне значення  $h = u_c/u_3$ , то з урахуванням міжсимвольної інтерференції, викликаної позанайквістовою швидкістю передавання, зменшенням сигналу в  $\mu$  разів, відношення сигнал/завада [2]:

$$h^* = \frac{u_c}{\sqrt{\mu(u_3^2 + u_{мз}^2)}}. \quad (4.17)$$

Як бачимо, відношення сигнал/шум в каналі зменшується через з'явлену міжсимвольну інтерференцію. Це зменшення ілюструється графіком  $h^* = f(h)$  для різних  $\mu$  [2].

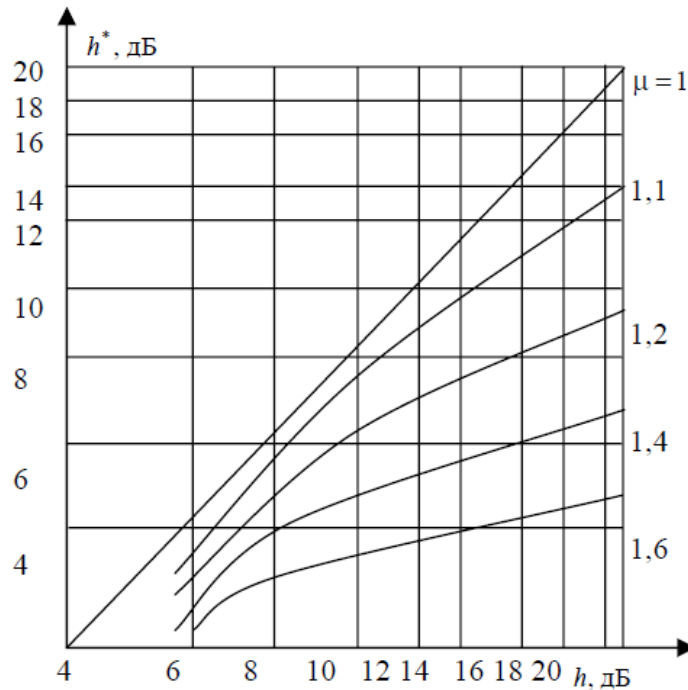


Рисунок 4.1 – Вплив флуктуаційного шуму на момент спрацьовування безінерційного реле

Наслідком зниження величини відношення сигнал/шум є зменшення завадостійкості переданої інформації. На графіках рис. 4.2 показано залежність ймовірності помилкового приймання елемента  $P_e$ , визначену для двійкової системи передавання з ЧМ за когерентного приймання відповідно до виразу [2]:

$$p_e = \left[ 1 - \Phi(h^*) \right], \quad (4.18)$$

де  $\Phi(h^*)$  - функція Крампа.

На рис. 4.2 показана залежність ймовірності помилки елемента за рахунок його скорочення в  $\mu$  разів, а на рис. 4.3 – з урахуванням міжсимвольних спотворень при зростанні  $\mu$ .

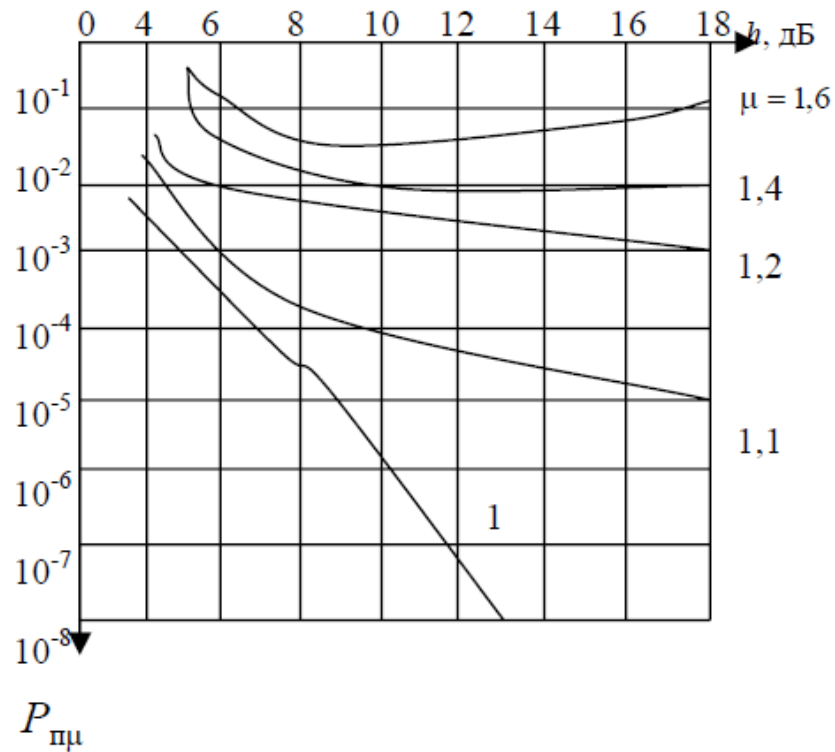


Рисунок 4.2 – Графік залежності ймовірності помилкового приймання елемента

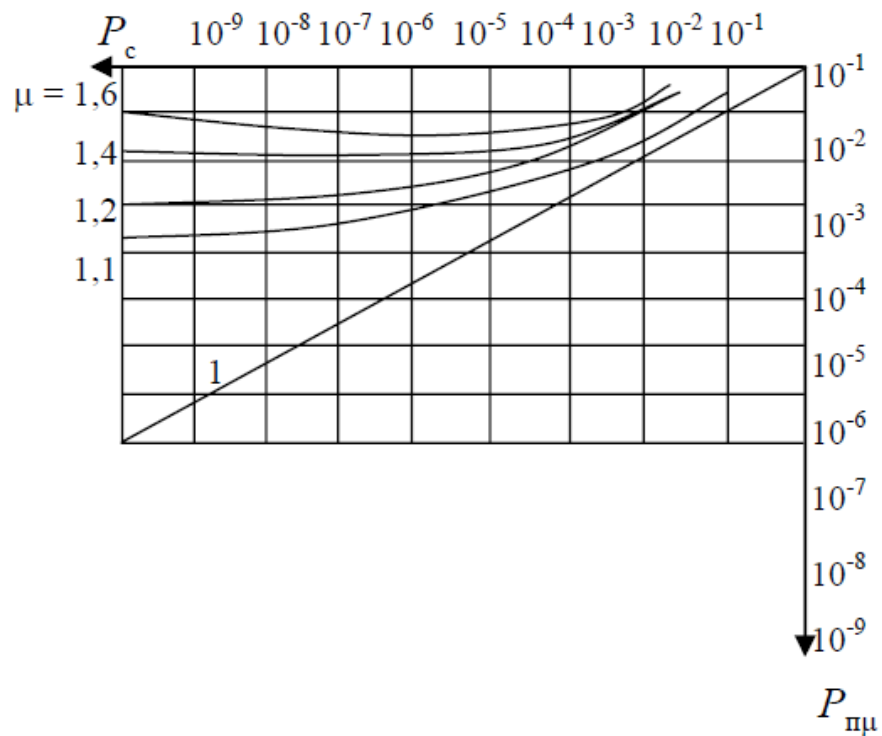


Рисунок 4.3 – Графік залежності ймовірності помилкового приймання елемента

Залежності  $p_{n\mu} = f(p_e)$  для  $\mu = 1, 1, 2; 1, 4; 1, 6$  лежать вище за пряму  $p_{n\mu} = |p_e|$ , що саме й свідчить про зменшення завадостійкості. Слід підкреслити, що втрати завадостійкості тим більші, чим вище  $\mu$ .

Збільшення пропускної здатності каналу [2]:

$$C = \mu [1 + p_n \log_2 p_n + (1 - p_n) \log_2 (1 - p_n)]. \quad (4.19)$$

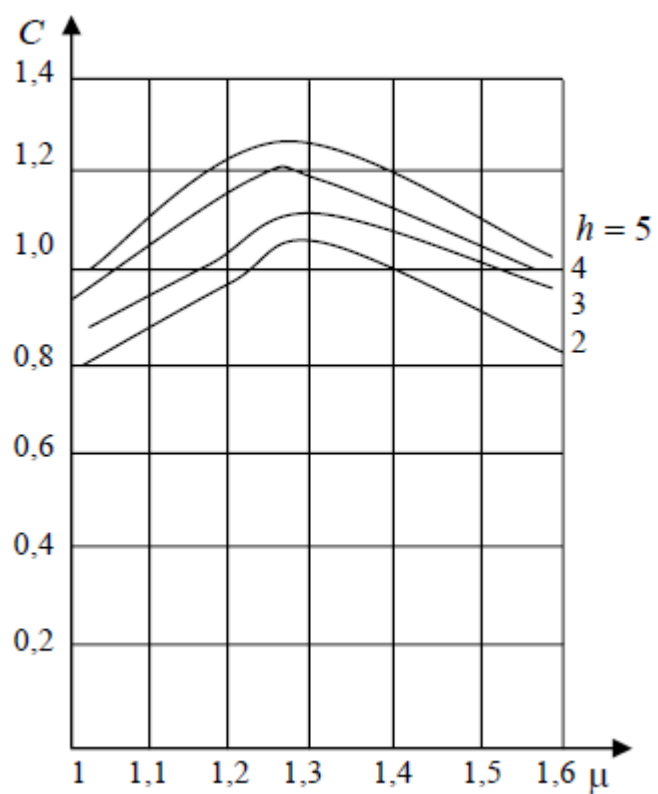
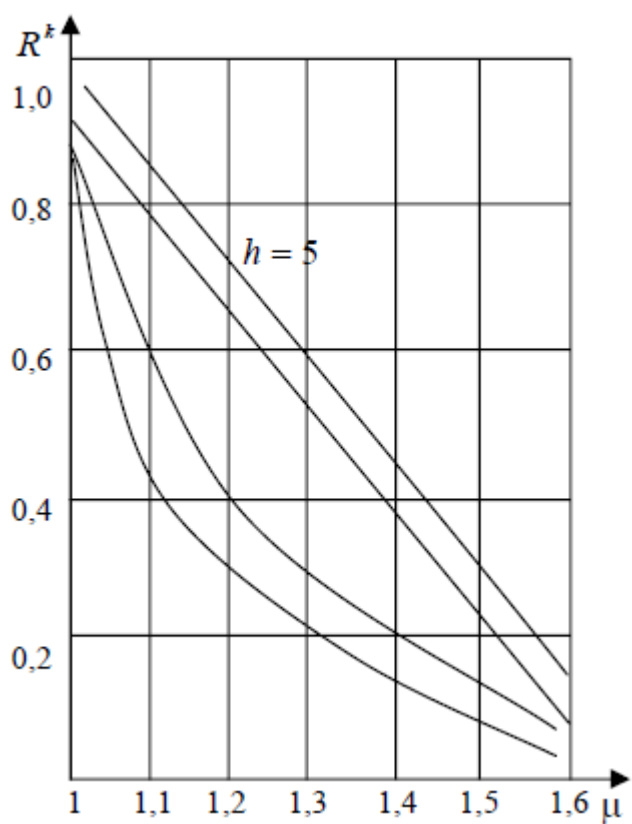
На рис. 4.4 наведено залежності  $C = f(\mu)$  для значень  $h = 2; 3; 4; 5$ .

Ефективність надлишкового коду:

$$p_{n\mu} = \frac{P_{n\mu}}{n(\mu)}, \quad (4.20)$$

де  $p_{n\mu}$  - ймовірність помилкового приймання кодової комбінації коду, який використовує елементарний сигнал  $\tau_1 = \frac{\tau_0}{\mu}$ .

На рис. 4.5 показана залежність швидкості передавання  $R^k$  від  $\mu$  з урахуванням числа надлишкових елементів згідно з табл. 4.1.

Рисунок 4.4 – Залежності  $C = f(\mu)$ Рисунок 4.5 – Графіки залежностей  $R^k = f(\mu)$

## 4.2 Ефективність ТСК для перетворення якості у швидкість передачі

Для оцінки ефективності використання таймерних сигналів для трансформації якості приймання у швидкість передавання інформації знайдемо зону  $\Delta$ , яку необхідно забезпечити при синтезі ТСК для отримання ймовірності помилкового приймання більше ніж при використанні надлишкової швидкості модуляції [2].

Вважаючи, що в каналі зв'язку з ЧМ, як і в попередньому прикладі, існує гауссівський шум із параметром  $h = \frac{u_c}{u_z} = 10$ . При збільшенні швидкості модуляції на 25 % (при базі сигналу  $B = \Delta F t_0 = 1$ ) за рахунок додаткових міжсимвольних завад нове співвідношення значення  $h^* = 4$  (6дБ) (див. рис. 4.1). Оцінимо величину втрат якості передавання [2].

Зважаючи на те, що інтеграл імовірності апроксимують з похибкою  $\delta < 0,02$  виразом [2]:

$$\Phi(z) = 0,5 - 0,65 \exp\left[-0,44(z + 0,75)^2\right]. \quad (4.21)$$

Для ймовірності помилкового приймання одного елемента РЦК маємо :

$$P_e = 0,65 \exp\left[-0,44(z + 0,75)^2\right]. \quad (4.22)$$

Для  $h = 10$  отримаємо  $P_e = 10^{-12}$ , а для  $h^* = 4$  за наднайквістової швидкості  $P_{ен} = 1 \cdot 10^{-2}$  (де  $P_e$  і  $P_{ен}$  – ймовірності помилки при найквістової і наднайквістової швидкості).

У зв'язку з тим, що в каналі з ЧМ  $\sigma_3 = 1/4h$ , то є можливість оцінити величину зони  $\Delta$ . Враховуючи вирази (4.28) легко показати, що для каналу з  $h = 10$   $\sigma_3 = \frac{1}{4 \cdot 10} = 2.5\%$  для отримання нерівності  $P(\Delta/2) \leq P_{ен} \approx 1 \cdot 10^{-2}$  достатньо вибрати зону  $\Delta = 0,2t_0$  ( $s = 6$ ), яка забезпечить імовірність помилкового приймання одного ЗМВ – (1)  $P_{зм}^{(1)} = 1 \cdot 10^{-2}$ .

Таблиця 4.1 – Кількість реалізацій ТСК для  $m \in 8,9$  при  $s=2;4;6;8;10;12;14;16;18;20$

$m \backslash s$	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
8	36	330	1716	6435	19448	50388	116280	245157	480700	888030
	4,02	4,3	4,5	4,67	4,76	5,11	5,3	5,49	5,52	5,596
9	330	6434	50388	245157	888030	2629275	6724520	15380937	32224114	62891499
	5	5,4	5,67	5,85	6	6,44	6,68	6,83	6,96	7,05

Для розрахування параметрів таймерного коду порівняємо ймовірності вірного приймання кодівих слів за наднайквістової швидкості передавання і ТСК [2].

Вважаючи, що суми гауссівської завади та міжсимвольних спотворень описується нормальним законом, імовірність вірного приймання при передаванні з наднайквістовою швидкістю буде

$$P_{ен} = (1 - P_{ен})^{n^*} = (0,99)^{12} = 0,886, \quad (4.23)$$

де  $n^*$  - число елементів у кодовім слові на інтервалі байта за наднайквістової швидкості.

При ТСК інформація міститься в числі ЗММ кодової конструкції та місцях їх розміщення. Тому що середнє число ЗММ на інтервалі  $T_c = 8t_c$  при  $s = 12$  дорівнює  $\bar{i} = 4,56$ , то:

$$P_{ен} = (1 - P_{зм})^{4,56} = 1 - 1 \cdot 10^{-2} = 0,955. \quad (4.24)$$

Порівнюючи  $P_{\text{вн}}$  і  $P_{\text{вт}}$  бачимо, що при ТСК не тільки швидкість передавання більше в 1,33 разів  $\left(\frac{16}{12}\right)$ , а й імовірність вірного приймання.

Порівняємо характеристики передавання для цього ж каналу за наднайквістової швидкості передавання сигналів ТСК для  $\Delta=0,25t_0$  ( $s=4$ ).

Згідно з табл. 4.2 видно, що число реалізацій при  $s=10$  і  $m=8$ ,  $N_p=19448$ , що відповідає 14-елементному кодовому слову ( $\log_2 19448=14$ ).

Ймовірність зміщення одного ЗМВ ( $P_{\text{зм}}^{(1)}$ ) за величину зони  $\Theta > 0,25t_0$

$$P_{\text{зм}}^{(1)} = 2 \left( 0,5 - \Phi \left( \frac{3,8}{2 \cdot 0,4} \right) \right) = 2 [0,5 - \Phi(4,75)] = 2,2 \cdot 10^{-6}. \quad (4.25)$$

Ймовірність вірного приймання ТСК буде дорівнювати:

$$P_{\text{вт}} = (0,999999914)^{\tau} = (0,999999914)^{4,56} = 0,999999608. \quad (4.26)$$

Із результатів розрахунків видно, що зменшення швидкості передавання при ТСК  $\left(\frac{16}{14}\right)$  на 14% суттєво збільшує функцію правдоподібності приймання конструкцій.

### Висновки до четвертого розділу

1. Порівнюючи імовірність вірного приймання при передаванні з наднайквістовою швидкістю ( $P_{\text{вн}}$ ) і імовірністю втрати інформації ( $P_{\text{вт}}$ ) видно, що при таймерних сигнальних конструкціях при порівнянні 16-елементного

кодового слова до 12-елементного кодового слова  $\left(\frac{16}{12}\right)$  швидкість передавання більше в 1,33 разів.

2. Зменшення швидкості передавання таймерних сигнальних конструкцій з 16-елементного кодового слова до 14-елементного кодового слова  $\left(\frac{16}{14}\right)$  на 14% збільшує функцію правдоподібності приймання конструкцій.

## ВИСНОВКИ

1. При збільшенні  $S$  з 2 до 9 зростає число реалізацій ТСК та пропускна здатність каналу. При  $s = 2$  та збільшенні  $m$  з 7 до 9 пропускна здатність каналу зростає на 15,2%. При  $s = 9$  та збільшенні  $m$  з 7 до 9 пропускна здатність каналу зростає на 0,93%(відношення сигнал/завада  $h = 8$ ).

2. При збільшенні  $S$  з 2 до 9 зростає число реалізацій ТСК та пропускна здатність каналу. При  $s = 2$  та збільшенні  $m$  з 7 до 9 пропускна здатність каналу зростає на 16%. При  $s = 9$  та збільшенні  $m$  з 7 до 9 пропускна здатність каналу зростає на 0,2%(відношення сигнал/завада  $h = 5$ ).

3. Максимальна пропускна здатність каналу зв'язку( $C_{\max}=2,417$  дв.од./с) досягається за умови, що  $t_0= 0.9575c$ ,  $m=7$ ,  $N_p\Sigma = 992687$ .

4. При зростанні швидкості передачі інформації  $R$  відношення сигнал/шум на вході приймача зменшується, в результаті чого зростає ймовірність бітової помилки  $P_b$ . При швидкості  $R = 100$  Мбіт/с при температурі шумів  $T_0 = 284K$ , потужності сигналу на вході приймача  $p_c = -105$  дБВт, відношення сигнал/шум складає  $E_b / N_0 = 10,15$ . При збільшенні швидкості  $R$  з 100 Мбіт/с до 160 Мбіт/с відношення сигнал/шум зменшиться на 37,4% і становитиме  $E_b / N_0 = 6,35$ , а ймовірність бітової помилки  $P_b$  збільшиться з  $0,32 \cdot 10^{-5}$  до  $1,83 \cdot 10^{-4}$ .

5. Зростання рівня потужності сигналу на вході приймача  $p_c$  призводить до збільшення відношення сигнал/шум на вході приймача, в результаті чого ймовірність бітової помилки  $P_b$  зменшується. При потужності сигналу  $p_c = -110$  дБВт при температурі шумів  $T_0 = 285K$ , швидкості передачі інформації  $R = 160$  Мбіт/с, відношення сигнал/шум складає  $E_b / N_0 = 2$ . При збільшенні потужності сигналу  $p_c$  з -110 дБВт до -

100 дБВт відношення сигнал/шум зросте на  $i$  і становитиме 20,01, а ймовірність бітової помилки  $P_b$  зменшиться з  $2,27 \cdot 10^{-2}$  до  $1,25 \cdot 10^{-10}$ .

6. Зростання шумової температури  $T$  зменшує відношення сигнал/шум на вході приймача, в результаті чого зростає ймовірність бітової помилки  $P_b$ . При температурі  $T = 284$  К, потужності сигналу на вході приймача  $p_c = -105$  дБВт, швидкості передачі інформації  $R = 100$  Мбіт/с, відношення сигнал/шум складає  $E_b / N_0 = 10,16$ . При збільшенні температури шумів з 284 К до 309 К відношення сигнал/шум зменшиться на 8,1 % і становитиме 9,34, а ймовірність бітової помилки  $P_b$  збільшиться з  $4,71 \cdot 10^{-6}$  до  $7,73 \cdot 10^{-6}$ .

7. Наприклад, при  $i = 5$ ,  $m = 10$ ,  $s = 10$  інформаційна ємність  $I_H = 2,173$  біт на елемент, а при  $s = 9$ ,  $i = 5$ ,  $m = 10$ ,  $I_H = 2,101$  біт на елемент. При збільшенні  $S$  з 9 до 12 збільшується інформаційна ємність і зростає число реалізацій  $N_{PT}$  з 2118760 до 8259888.

8. На інформаційну ємність найквістового елемента  $I_H$  впливає кількість переходів “ $i$ ” в таймерних сигнальних конструкціях. Збільшення числа заданих відрізків сигналу на інтервалі кодового слова  $i \in (1 \div 8)$  дає змогу підвищити показник інформаційної ємності  $I_H$ , але при  $i \rightarrow m - 1$  значення  $I_H$  падає. Максимальне значення інформаційної ємності досягається при  $i = 8$ . Якщо  $i = 8$ ,  $m = 12$  при  $s = 20$ , то  $I_H = 2,992$  біт на елемент, але при цьому ймовірність помилкового прийому  $P_{\text{пом}} > 10^{-5}$ , що призводить до зниження якості передачі цифрової інформації. Рациональне значення інформаційної ємності можна отримати при,  $s = 17$ ,  $m = 12$ ,  $i = 8$  тоді,  $I_H = 2,845$  біт на елемент, що дозволяє забезпечити високу якість передачі інформації ( $P_{\text{пом}} < 10^{-5}$ ).

8. Порівнюючи імовірність вірного приймання при передаванні з наднайквістовою швидкістю ( $P_{\text{вн}}$ ) і імовірністю втрати інформації ( $P_{\text{вт}}$ ) видно, що при таймерних сигнальних конструкціях при порівнянні 16-елементного кодового слова до 12-елементного кодового слова  $\left(\frac{16}{12}\right)$  швидкість передавання більше в 1,33 разів. Зменшення швидкості передавання таймерних сигнальних конструкцій з 16-елементного кодового слова до 14-елементного кодового слова  $\left(\frac{16}{14}\right)$  на 14% збільшує функцію правдоподібності приймання конструкцій.

9. При моделюванні таймерних сигнальних конструкцій досягнуто підвищення ефективності пропускнуої здатності каналу зв'язку на 8,22% в умовах дії флуктуаційних завад при вказаній імовірності бітових помилок для забезпечення заданої якості зв'язку.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Захарченко М.В. Системи передавання даних. – Т. 1: Завадостійке 3-38 кодування : підручник [для студентів вищих технічних навчальних закладів] / М.В. Захарченко. – Одеса : Фенікс, 2009. – 448 с.
2. Захарченко М.В. Системи передавання даних. – Т.1: Ефективність блокового кодування / [Захарченко М.В., Кільдішев В.Й., Мартинова О.М., Ільїн Д.Ю., Трінтіна Н.А.]: навч. посіб. для студентів вищих технічних навчальних закладів, які навчаються за напрямками: 6.050903«Телекомунікації»; 6.050904 «Мережі та системи поштового зв'язку»;6.050801 «Радіотехніка». – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2014. – 440 с.
3. Драганов А.В., Гринь А.А. Ефективність систем зі зворотним зв'язком при таймерному кодуванні // Системы и средства передачи и обработки информации: Тр. VI Междунар. науч.-практич. конф. 3–8 сентября 2002 г. – Одесса, 2002. – С. 79–80.
4. Драганов О.В. Оптимізація базового елемента багатопозиційних часових кодів при зміні параметрів каналу // Наук. праці ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2002. – №1. – С. 104–107.
5. Хомич С.В. Корреляционный метод декодирования таймерных сигнальных конструкций / С.В. Хомич // Вестник НТУ «ХПИ». – 2011. – Вип. 58. – С. – 143–148.
6. Эффективность использования таймерных сигнальных конструкций (ТСК) в системах с решающей обратной связью (рос.) / Д.Н. Бектурсунов //Materials of the XI International Scientific and practical conference (ISBN 978-966-8736-05-6), «CUTTING-EDGE SCIENCE-2015». – Шеффилд, Англия. – 2015.V.28. – С. 58-62.
7. Определение координат диафантовых уравнений при формировании таймерных сигнальных конструкций (ТСК) удовлетворяющих условию /Бектурсунов Д.Н. // Труды III научно-практической конференции [«Нурлы жол|путь в будущее»] (II том). – Шымкент (Казахстан). – 2015. – С. 66-70.

8. Сигналы с управляемой межсимвольной интерференцией /Н.В. Захарченко, Д.Н. Бектурсунов, А.С. Криль, Е.Б. Шамшидин // Eastern European Scientific Journal (ISSN 2199-7977). – Düsseldorf (Germany). – 2015. – DOI 10.12851/EESJ201510. – С. 113-118.

9. Эффективность передачи ТСК сигнальных конструкций кода Слепяна / Н.В. Захарченко, Ю.С. Горохов, Д.Н. Бектурсунов, И.Б. Гранатурова // «Научная перспектива» научно-аналитический журнал (ISSN 2077-3153). –Уфа (Россия). – 2015. – № 9(67). – С. 62-66.

10. Оценка влияния уровня помех на пропускную способность канала связи с таймерными сигналами (Assessing the impact of the noise on the throughput communication channel with timing signals) / Н.В. Захарченко, В.В. Корчинский, Б.К. Радзимовский, Д.Н. Бектурсунов, Ю.С. Горохов // Eastern European Scientific Journal (ISSN 2199-7977). – Düsseldorf (Germany). – 2015. – DOI 10.12851/EESJ201508. – С. 209-214.

11. Аксенов Б.Е. Об одном методе исследования потоков ошибок в каналах связи / Б.Е. Аксенов, А.М. Александров // Проблемы передачи информации. –1968. – Т. IV, вып. 4. – С. 79 – 86.

12. Басов В.Е. Эффективность совместного использования многопозиционных сигналов и сверточных кодов: дис. канд. техн. наук: 05.12.02 / Басов Виктор Евгеньевич. – Одесса, 2006. – 208 с.

13. Блох Э.Л. Модели источника ошибок в каналах передачи цифровой информации / Блох Э.Л., Попова О.В., Турин В.Я. – М.: Связь, 1971. – 312 с.

14. Бояринов И.М., Кацман Г.Л. Методы построения и реализация линейных кодов, исправляющих ошибки. В сб.: Информационный обмен в вычислительных сетях / Бояринов И.М., Кацман Г.Л.; под ред. С.И. Самойленко. – М.: Наука, 1980. – С. 47-65.

15. Брусиловский К.А. К определению степени стартстопного искажения при коррелированных смещениях границ посылок / Брусиловский К.А., Лещук И.А., Захарченко Н.В. // Вопросы радиоэлектроники. [Сер. "Техника проводной связи"] – 1968, вып 1, – С. 50 – 56.
16. Буга Н.Н. Основы теории связи и передачи данных / Буга Н.Н. – Ч. I. – Л.: ВИКА им. А.Ф. Можайского, 1968. – 542 с.
17. Варакин Л.Е. Теория систем сигналов / Варакин Л.Е. – М.: Сов. радио, 1978. – 304 с.
18. Витерби А. Д. Принципы цифровой связи и кодирования / А. Д. Витерби, Дж. К. Омура, пер. с англ.; под ред. К. Ш. Зигангирова. – М.: Радио и связь, 1982. – 536 с.
19. Волькенштейн М. В. Энтропия и информация / Волькенштейн М. В., – М.: Наука, 1986. – 192 с.
20. Голдман С. Теория информации / Голдман С., – М.: Издательство иностранной литературы, 1957.
21. Емельянов Г.А. К вопросу об измерении дроблений двоичных посылок на работающих каналах связи / Емельянов Г.А., Чекулаев С.А., Шувалов В.П. // Научные труды ЦНИИС. – М., 1967, вып. 2. – С. 50 – 68.
22. Зюко А.Г., Фалько А.И., Банкет В.Л., Иващенко П.В. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации / Зюко А.Г., Фалько А.И., Банкет В.Л., Иващенко П.В., под ред. А.Г. Зюко. – М.: Радио и связь, 1985. – 304 с.
23. Зюко А.Г. Эффективность систем передачи сообщений / Зюко А.Г. // Электросвязь. – 1977. – № 6. – С. 17 – 19.
24. Игнатов В.А. Теория информации и передачи сигналов / Игнатов В.А. – М.: Сов. радио, 1979. – 280 с.
25. Каналы передачи данных: под ред. К.О. Шварцмана. – М.: Связь, 1970. – 288 с.
26. Колесник В.Д. Декодирование циклических кодов / В.Д. Колесник, Е.Т. Мирончиков. – М.: Связь, 1968. – 251 с.
27. Коричнев Л.П. Статистический контроль каналов связи / Л.П. Коричнев, В.Д. Королев. – М.: Радио связь, 1989. – 240 с.

28. Курицин С.А. Теоретические основы построения адаптивных систем: учеб. пособ / Курицин С.А. – Л.: ЛЭИС, 1983. – 64 с.
29. Лосев В.В. Поиск и декодирование сложных дискретных сигналов / Лосев В.В., Бродская Е.Б., Коржик В.И.; под ред. В.И. Коржика. – М.: Радио и связь, 1988. – 224 с.
30. Мазурков М.И. Цифровые методы в радиосистемах передачи информации Мазурков М.И. – Одесса: ОПИ, 1984. –101 с.
31. Мартин Н. Математическая теория энтропии / Мартин Н., Ингленд Дж. – М.: Мир, 1988. – 350 с.
32. Ануфриев И.Е. MATLAB 7/ Ануфриев И.Е., Смирнов А.Б., Смирнова Е.Н. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.
33. Беллами Дж. Цифровая телефония/ Дж. Беллами; пер. с англ. под ред.А.Н. Берлина. – М.: Эко-Трендз, 2004. – 567 с.
34. Берлин А.Н. Цифровые сотовые системы связи/ Берлин А.Н. – М.: Эко-Трендз, 2007. – 296 с.
35. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами/ Варакин Л.Е. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
36. Долуханов М.П. Распространение радиоволн: учеб. для вузов/ Долуханов М.П. – М.: Связь, 1972. – 336 с.
37. Маковеева М.М. Системы связи с подвижными объектами/ Маковеева М.М., Шинаков Ю.С. – М.: Радио и связь, 2002. – 440 с.
38. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации/ [А.Г. Зюко, А.И. Фалько, И.П. Панфилов и др.]. – М.: Радио и связь, 1985. – 272 с.
39. Прокис Дж. Цифровая связь/ Дж. Прокис; пер. с англ. под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
40. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение/ Скляр Б.: [2-е изд.]; пер. с англ. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
41. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра/ Феер К.; пер. с англ. под ред. В.И. Журавлева. – М.: Радио и связь, 2000. – 520 с.

42. Мазурков М.И. Алгоритмы рекуррентного декодирования в целом кодов Рида–Соломона / М.И. Мазурков, С.В. Миц, В.Я. Чечельницкий // Радиоэлектроника. 2003. – №6. – С. 34-38. (Изв. высш. учебн. заведений).
43. Мак-Вильямс Ф. Дж. Теория кодов, исправляющих ошибки / Ф. Дж. Мак-Вильямс, Н. Дж. А. Слоэн. – М.: Связь 1979. – 732 с.
44. Шеннон К. Математическая теория связи. Работы по теории информации и кибернетике / Шеннон К.; пер с англ.; под ред. Р.Л. Добрушина и О.В. Лупанова. – М.: ИЛ, 1963. – 830 с.
45. Харкевич А.А. Очерки общей теории связи / Харкевич А.А. – М.: Гостехиздат, 1955. – 268 с.
46. Теория кодирования / [Касами Т., Такура Н., Ивадари Е., Инагаки Я.]; пер с япон.; под ред. Б.С. Цыбакова и С.И. Гельфанда. – М.: Мир, 1978. – 576.
47. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений / Финк Л.М. – М.: Сов. радио, 1970. – 726 с.
48. Системы электросвязи: [учебник для вузов] / [В.П. Шувалов, С.И. Горшкова, Г.П. Катунин и др. ]; под ред. В.П. Шувалова. – М.: Радио и связь, 1987.
49. Пухов Г.Е. Вычислительные устройства на таймерных скаляторах / Пухов Г.Е., Бордаченко В.П., Королев Ю.П. – К.: Техніка, 1991. – 215 с.
50. Митряев Е.В. Контроль верности информации в морской радиосвязи / Митряев Е.В., Ростовцев Ю.Г., Рышков Ю.П. – Л.: Судостроение, 1979. – 164 с.

ДОДАТОК А  
(ДОВІДКОВИЙ)

ТАБЛИЦІ  $Q$  – ФУНКЦІЇ  $Q(x)$

Таблиця А.1 – дані  $Q$  – функції  $Q(x)$ ,  $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-u^2/2} du$   $Q(-x) = 1 - Q(x)$

x	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.4960	0.4920	0.4880	0.4840	0.4801	0.4761	0.4721	0.4681	0.4641
0.1	0.4602	0.4562	0.4522	0.4483	0.4443	0.4404	0.4364	0.4325	0.4286	0.4247
0.2	0.4207	0.4168	0.4129	0.4090	0.4052	0.4013	0.3974	0.3936	0.3897	0.3859
0.3	0.3821	0.3783	0.3745	0.3707	0.3669	0.3632	0.3594	0.3557	0.3520	0.3483
0.4	0.3446	0.3409	0.3372	0.3336	0.3300	0.3264	0.3228	0.3192	0.3156	0.3121
0.5	0.3085	0.3050	0.3015	0.2981	0.2946	0.2912	0.2877	0.2843	0.2810	0.2776
0.6	0.2743	0.2709	0.2676	0.2643	0.2611	0.2578	0.2546	0.2514	0.2483	0.2451
0.7	0.2420	0.2389	0.2358	0.2327	0.2297	0.2266	0.2236	0.2206	0.2177	0.2148
0.8	0.2119	0.2090	0.2061	0.2033	0.2005	0.1977	0.1949	0.1922	0.1894	0.1867
0.9	0.1841	0.1814	0.1788	0.1762	0.1736	0.1711	0.1685	0.1660	0.1635	0.1611
1.0	0.1587	0.1562	0.1539	0.1515	0.1492	0.1469	0.1446	0.1423	0.1401	0.1379
1.1	0.1357	0.1335	0.1314	0.1292	0.1271	0.1251	0.1230	0.1210	0.1190	0.1170
1.2	0.1151	0.1131	0.1112	0.1093	0.1075	0.1056	0.1038	0.1020	0.1003	0.0985
1.3	0.968	0.0951	0.0934	0.0918	0.0901	0.0885	0.0869	0.0853	0.0838	0.0823
1.4	0.0808	0.0793	0.0778	0.0764	0.0749	0.0735	0.0721	0.0708	0.0694	0.0681
1.5	0.0668	0.0655	0.0643	0.0630	0.0618	0.0606	0.0594	0.0582	0.0571	0.0559
1.6	0.0548	0.0537	0.0526	0.0516	0.0505	0.0495	0.0485	0.0475	0.0465	0.0455
1.7	0.0446	0.0436	0.0427	0.0418	0.0409	0.0401	0.0392	0.0384	0.0375	0.0367
1.8	0.0359	0.0351	0.0344	0.0336	0.0329	0.0322	0.0314	0.0307	0.0301	0.0294
1.9	0.0287	0.0281	0.0274	0.0268	0.0262	0.0256	0.0250	0.0244	0.0239	0.0233
2.0	0.2275E-01	0.2222E-01	0.2169E-01	0.2118E-01	0.2068E-01	0.2018E-01	0.1970E-01	0.1923E-01	0.1876E-01	0.1831E-01
2.1	0.1786E-01	0.1743E-01	1.700E-01	0.1659E-01	0.1618E-01	0.1578E-01	0.1539E-01	0.1500E-01	0.1463E-01	0.1426E-01
2.2	0.1390E-01	0.1355E-01	0.1321E-001	0.1287E-01	0.1255E-01	0.1222E-01	0.1191E-01	0.1160E-01	0.1130E-01	0.1101E-01
2.3	0.1072E-01	0.1044E-01	0.1017E-01	0.9903E-02	0.9642E-02	0.9387E-02	0.9137E-02	0.8894E-02	0.8656E-02	0.8424E-02

Таблиця А.2 – дані  $Q$  – функції

$x$	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
2.4	0.8198E-02	0.7976E-02	0.7760E-02	0.7549E-02	0.7344E-02	0.7143E-02	0.6947E-02	0.6756E-02	0.6569E-02	0.6387E-02
2.5	0.6210E-02	0.6037E-02	0.5868E-02	0.5703E-02	0.5543E-02	0.5386E-02	0.5234E-02	0.5085E-02	0.4940E-02	0.4799E-02
2.6	0.4661E-02	0.4527E-02	0.4396E-02	0.4269E-02	0.4145E-02	0.4025E-02	0.3907E-02	0.3793E-02	0.3681E-02	0.3573E-02
2.7	0.3467E-02	0.3364E-02	0.3264E-02	0.3167E-02	0.3072E-02	0.2980E-02	0.2890E-02	0.2803E-02	0.2718E-02	0.2635E-02
2.8	0.2555E-02	0.2477E-02	0.2401E-02	0.2327E-02	0.2256E-02	0.2186E-02	0.2118E-02	0.2052E-02	0.1988E-02	0.1926E-02
2.9	0.1866E-02	0.1807E-02	0.1750E-02	0.1695E-02	0.1641E-02	0.1589E-02	0.1538E-02	0.1489E-02	0.1441E-02	0.1395E-02
3.0	0.1350E-02	0.1306E-02	0.1264E-02	0.1223E-02	0.1183E-02	0.1144E-02	0.1107E-02	0.1070E-02	0.1035E-02	0.1001E-02
3.1	0.9676E-03	0.9354E-03	0.9043E-03	0.8740E-03	0.8447E-03	0.8164E-03	0.7888E-03	0.7622E-03	0.7364E-03	0.7114E-03
3.2	0.6871E-03	0.6637E-03	0.6410E-03	0.6190E-03	0.5977E-03	0.5770E-03	0.5571E-03	0.5377E-03	0.5190E-03	0.5009E-03
3.3	0.4834E-03	0.4665E-03	0.4501E-03	0.4342E-03	0.4189E-03	0.4041E-03	0.3897E-03	0.3758E-03	0.3624E-03	0.3495E-03
3.4	0.3369E-03	0.3248E-03	0.3131E-03	0.3018E-03	0.2909E-03	0.2803E-03	0.2701E-03	0.2602E-03	0.2507E-03	0.2415E-03
3.5	0.2326E-03	0.2241E-03	0.2158E-03	0.2078E-03	0.2001E-03	0.1926E-03	0.1854E-03	0.1785E-03	0.1718E-03	0.1653E-03
3.6	0.1591E-03	0.1531E-03	0.1473E-03	0.1417E-03	0.1363E-03	0.1311E-03	0.1261E-03	0.1213E-03	0.1166E-03	0.1121E-03
3.7	0.1078E-03	0.1036E-03	0.9961E-04	0.9574E-04	0.9201E-04	0.8842E-04	0.8496E-04	0.8162E-04	0.7841E-04	0.7532E-04
3.8	0.7235E-04	0.6948E-04	0.6673E-04	0.6407E-04	0.6152E-04	0.5906E-04	0.5669E-04	0.5442E-04	0.5223E-04	0.5012E-04
3.9	0.4810E-04	0.4615E-04	0.4427E-04	0.4247E-04	0.4074E-04	0.3908E-04	0.3748E-04	0.3594E-04	0.3446E-04	0.3304E-04
4.0	0.3167E-04	0.3036E-04	0.2910E-04	0.2789E-04	0.2673E-04	0.2561E-04	0.2454E-04	0.2351E-04	0.2252E-04	0.2157E-04
4.1	0.2066E-04	0.1978E-04	0.1894E-04	0.1814E-04	0.1737E-04	0.1662E-04	0.1591E-04	0.1523E-04	0.1458E-04	0.1395E-04
4.2	0.1335E-04	0.1277E-04	0.1222E-04	0.1168E-04	0.1118E-04	0.1069E-04	0.1022E-04	0.9774E-05	0.9345E-05	0.8934E-05
4.3	0.8540E-05	0.8163E-05	0.7802E-05	0.7456E-05	0.7124E-05	0.6807E-05	0.6503E-05	0.6212E-05	0.5934E-05	0.5668E-05
4.4	0.5413E-05	0.5169E-05	0.4935E-05	0.4712E-05	0.4498E-05	0.4294E-05	0.4098E-05	0.3911E-05	0.3732E-05	0.3561E-05
4.5	0.3398E-05	0.3241E-05	0.3092E-05	0.2949E-05	0.2813E-05	0.2682E-05	0.2558E-05	0.2439E-05	0.2325E-05	0.2216E-05
4.6	0.2112E-05	0.2013E-05	0.1919E-05	0.1828E-05	0.1742E-05	0.1660E-05	0.1581E-05	0.1506E-05	0.1434E-05	0.1366E-05
4.7	0.1301E-05	0.1239E-05	0.1179E-05	0.1123E-05	0.1069E-05	0.1017E-05	0.9680E-06	0.9211E-06	0.8765E-06	0.8339E-06
4.8	0.7933E-06	0.7547E-06	0.7178E-06	0.6827E-06	0.6492E-06	0.6173E-06	0.5869E-06	0.5580E-06	0.5304E-06	0.5042E-06
4.9	0.4792E-06	0.4554E-06	0.4327E-06	0.4112E-06	0.3906E-06	0.3711E-06	0.3525E-06	0.3348E-06	0.3179E-06	0.3019E-06
5.0	0.2867E-06	0.2722E-06	0.2584E-06	0.2452E-06	0.2328E-06	0.2209E-06	0.2096E-06	0.1989E-06	0.1887E-06	0.1790E-06
5.1	0.1698E-06	0.1611E-06	0.1528E-06	0.1449E-06	0.1374E-06	0.1302E-06	0.1235E-06	0.1170E-06	0.1109E-06	0.1051E-06
5.2	0.9964E-07	0.9442E-07	0.8946E-07	0.8475E-07	0.8029E-07	0.7605E-07	0.7203E-07	0.6821E-07	0.6459E-07	0.6116E-07
5.3	0.5790E-07	0.5481E-07	0.5188E-07	0.4911E-07	0.4647E-07	0.4398E-07	0.4161E-07	0.3937E-07	0.3724E-07	0.3523E-07
5.4	0.3332E-07	0.3151E-07	0.2980E-07	0.2818E-07	0.2664E-07	0.2518E-07	0.2381E-07	0.2250E-07	0.2127E-07	0.2010E-07

Таблиця А.3 – дані  $Q$  – функції

$x$	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
5.5	0.1899E-07	0.1794E-07	0.1695E-07	0.1601E-07	0.1512E-07	0.1428E-07	0.1349E-07	0.1274E-07	0.1203E-07	0.1135E-07
5.6	0.1072E-07	0.1012E-07	0.9548E-08	0.9011E-08	0.8503E-08	0.8022E-08	0.7569E-08	0.7140E-08	0.6735E-08	0.6352E-08
5.7	0.5990E-08	0.5649E-08	0.5326E-08	0.5022E-08	0.4734E-08	0.4462E-08	0.4206E-08	0.3964E-08	0.3735E-08	0.3519E-08
5.8	0.3316E-08	0.3124E-08	0.2942E-08	0.2771E-08	0.2610E-08	0.2458E-08	0.2314E-08	0.2179E-08	0.2051E-08	0.1931E-08
5.9	0.1818E-08	0.1711E-08	0.1610E-08	0.1515E-08	0.1425E-08	0.1341E-08	0.1261E-08	0.1186E-08	0.1116E-08	0.1049E-08
6.0	0.9866E-09	0.9276E-09	0.8721E-09	0.8198E-09	0.7706E-09	0.7242E-09	0.6806E-09	0.6396E-09	0.6009E-09	0.5646E-09
6.1	0.5303E-09	0.4982E-09	0.4679E-09	0.4394E-09	0.4126E-09	0.3874E-09	0.3637E-09	0.3415E-09	0.3205E-09	0.3008E-09
6.2	0.2823E-09	0.2649E-09	0.2486E-09	0.2332E-09	0.2188E-09	0.2052E-09	0.1925E-09	0.1805E-09	0.1693E-09	0.1587E-09
6.3	0.1488E-09	0.1395E-09	0.1308E-09	0.1226E-09	0.1149E-09	0.1077E-09	0.1009E-09	0.9451E-10	0.8854E-10	0.8294E-10
6.4	0.7769E-10	0.7276E-10	0.6814E-10	0.6380E-10	0.5974E-10	0.5593E-10	0.5235E-10	0.4900E-10	0.4586E-10	0.4292E-10
6.5	0.4016E-10	0.3758E-10	0.3515E-10	0.3289E-10	0.3076E-10	0.2877E-10	0.2690E-10	0.2516E-10	0.2352E-10	0.2199E-10
6.6	0.2056E-10	0.1922E-10	0.1796E-10	0.1678E-10	0.1568E-10	0.1465E-10	0.1369E-10	0.1279E-10	0.119.5E-10	0.1116E-10
6.7	0.1042E-10	0.9731E-11	0.9086E-11	0.8483E-11	0.7919E-11	0.7392E-11	0.6900E-11	0.6439E-11	0.6009E-11	0.5607E-11
6.8	0.5231E-11	0.4880E-11	0.4552E-11	0.4246E-11	0.3960E-11	0.3693E-11	0.3443E-11	0.3210E-11	0.2993E-11	0.2790E-11
6.9	0.2600E-11	0.2423E-11	0.2258E-11	0.2104E-11	0.1961E-11	0.1826E-11	0.1701E-11	0.1585E-11	0.1476E-11	0.1374E-11
7.0	0.1280E-11	0.1192E-11	0.1109E-11	0.1033E-11	0.9612E-12	0.8946E-12	0.8325E-12	0.7747E-12	0.7208E-12	0.6706E-12
	$Q(x)$	$x$				$Q(x)$	$x$			
	1E-01	1.28115				1E-06	4.75342			
	1E-02	2.32635				1E-07	5.19934			
	1E-03	3.09023				1E-08	5.61200			
	1E-04	3.71902				1E-09	5.99781			
	1E-05	4.26489				1E-10	6.63134			

## ДОДАТОК Б

(довідковий)

## ЗНАЧЕННЯ ІНТЕГРАЛУ ІМОВІРНОСТІ

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_0^x e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$

x	Φ(x)	x	Φ(x)	x	Φ(x)
1.000	0.341344746068543	2.000	0.477249868051821	3.000	0.498650101968370
1.010	0.343752354978745	2.010	0.477784405570569	3.010	0.498693761551231
1.020	0.346135769627265	2.020	0.478308306232353	3.020	0.498736126572328
1.030	0.348494997211656	2.030	0.478821730357328	3.030	0.498777231306408
1.040	0.350830049669019	2.040	0.479324837133930	3.040	0.498817109256896
1.050	0.353140943624104	2.050	0.479817784594296	3.050	0.498855793168977
1.060	0.355427700336090	2.060	0.480300729590623	3.060	0.498893315042591
1.070	0.357690345644061	2.070	0.480773827772483	3.070	0.498929706145321
1.080	0.359928909911231	2.080	0.481237233565062	3.080	0.498964997025197
1.090	0.362143427967965	2.090	0.481691100148341	3.090	0.498999217523386
1.100	0.364333939053617	2.100	0.482135579437183	3.100	0.499032396786782
1.110	0.366500486757253	2.110	0.482570822062343	3.110	0.499064563280486
1.120	0.368643118957269	2.120	0.482996977352367	3.120	0.499095744800178
1.130	0.370761887759982	2.130	0.483414193316395	3.130	0.499125968484368
1.140	0.372856849437202	2.140	0.483822616627834	3.140	0.499155260826541
1.150	0.374928064362850	2.150	0.484222392608909	3.150	0.499183647687171
1.160	0.376975596948657	2.160	0.484613665216074	3.160	0.499211154305625
1.170	0.378999515578982	2.170	0.484996577026268	3.170	0.499237805311933
1.180	0.380999892544799	2.180	0.485371269224011	3.180	0.499263624738446
1.190	0.382976803976891	2.190	0.485737881589331	3.190	0.499288636031355
1.200	0.384930329778292	2.200	0.486096552486501	3.200	0.499312862062084
1.210	0.386860553556023	2.210	0.486447418853580	3.210	0.499336325138560
1.220	0.388767562552165	2.220	0.486790616192744	3.220	0.499359047016340
1.230	0.390651447574308	2.230	0.487126278561398	3.230	0.499381048909613
1.240	0.392512302925413	2.240	0.487454538564053	3.240	0.499402351502066
1.250	0.394350226333145	2.250	0.487775527344955	3.250	0.499422974957609
1.260	0.396165318878700	2.260	0.488089374581453	3.260	0.499442938930975
1.270	0.397957684925181	2.270	0.488396208478096	3.270	0.499462262578170
1.280	0.399727432045558	2.280	0.488696155761447	3.280	0.499480964566793
1.290	0.401474670950252	2.290	0.488989341675589	3.290	0.499499063086214
1.300	0.403199515414390	2.300	0.489275889978324	3.300	0.499516575857616
1.310	0.404902082204761	2.310	0.489555922938049	3.310	0.499533520143892
1.320	0.406582491006528	2.320	0.489829561331280	3.320	0.499549912759408
1.330	0.408240864349719	2.330	0.490096924440836	3.330	0.499565770079618
1.340	0.409877327535548	2.340	0.490358130054642	3.340	0.499581108050550
1.350	0.411492008562598	2.350	0.490613294465161	3.350	0.499595942198136
1.360	0.413085038052915	2.360	0.490862532469427	3.360	0.499610287637418
1.370	0.414656549178033	2.370	0.491105957369663	3.370	0.499624159081600
1.380	0.416206677584986	2.380	0.491343680974483	3.380	0.499637570850967
1.390	0.417735561322331	2.390	0.491575813600654	3.390	0.499650536881662
1.400	0.419243340766229	2.400	0.491802464075404	3.400	0.499663070734323
1.410	0.420730158546608	2.410	0.492023739739266	3.410	0.499675185602581
1.420	0.422196159473454	2.420	0.492239746449446	3.420	0.4996868894321419
1.430	0.423641490463261	2.430	0.492450588583691	3.430	0.499698209375391
1.440	0.425066300465673	2.440	0.492656369044651	3.440	0.499709142906709

1.450	0.426470740390352	2.450	0.492857189264728	3.450	0.499719706723184
1.460	0.427854963034106	2.460	0.493053149211376	3.460	0.499729912306037
1.470	0.429219123008315	2.470	0.493244347392859	3.470	0.499739770817573
1.480	0.430563376666668	2.480	0.493430880864453	3.480	0.499749293108720
1.490	0.431887882033275	2.490	0.493612845235057	3.490	0.499758489726432
1.500	0.433192798731142	2.500	0.493790334674224	3.500	0.499767370920964
1.510	0.434478287911084	2.510	0.493963441919587	3.510	0.499775946653009
1.520	0.435744512181064	2.520	0.494132258284667	3.520	0.499784226600705
1.530	0.436991835536022	2.530	0.494296873667049	3.530	0.499792220166519
1.540	0.438219823288188	2.540	0.494457376556917	3.540	0.499799936483993
1.550	0.439429241997941	2.550	0.494613854045933	3.550	0.499807384424364
1.560	0.440620059405207	2.560	0.494766391836444	3.560	0.499814572603067
1.570	0.441792444361447	2.570	0.494915074251009	3.570	0.499821509386095
1.580	0.442946566762246	2.580	0.495059984242229	3.580	0.499828202896254
1.590	0.444082597480531	2.590	0.495201203402874	3.590	0.499834661019280
1.600	0.445200708300442	2.600	0.495338811976281	3.600	0.499840891409843
1.610	0.446301071851880	2.610	0.495472888867033	3.610	0.499846901497426
1.620	0.447383861545748	2.620	0.495603511651879	3.620	0.499852698492093
1.630	0.448449251509911	2.630	0.495730756590910	3.630	0.499858289390124
1.640	0.449497418525896	2.640	0.495854698638964	3.640	0.499863680979554
1.650	0.450528531966352	2.650	0.495975411457242	3.650	0.499868879845580
1.660	0.451542773733277	2.660	0.496092967425147	3.660	0.499873892375862
1.670	0.452540318197053	2.670	0.496207437652314	3.670	0.499878724765715
1.680	0.453521342136280	2.680	0.496318891990825	3.680	0.499883383023185
1.690	0.454486022678450	2.690	0.496427399047600	3.690	0.499887872974018
1.700	0.455434537241457	2.700	0.496533026196959	3.700	0.499892200266523
1.710	0.456367063475968	2.710	0.496635839593331	3.710	0.499896370376326
1.720	0.457283779208671	2.720	0.496735904184109	3.720	0.499900388611024
1.730	0.458184862386405	2.730	0.496833283722842	3.730	0.499904260114731
1.740	0.459070491021193	2.740	0.496928040781349	3.740	0.499907989872526
1.750	0.459940843136183	2.750	0.497020236764945	3.750	0.499911582714799
1.760	0.460796096712517	2.760	0.497109931923774	3.760	0.499915043321502
1.770	0.461636429637129	2.770	0.497197185367235	3.770	0.499918376226297
1.780	0.462462019651483	2.780	0.497282055077299	3.780	0.499921585820816
1.790	0.463273044301274	2.790	0.497364597922095	3.790	0.499924676357621
1.800	0.464069680887074	2.800	0.497444869689572	3.800	0.499927651956075
1.810	0.464852106415961	2.810	0.497522925001214	3.810	0.4999305166604120
1.820	0.465620497554110	2.820	0.497598817525811	3.820	0.499933274162970
1.830	0.466375030580372	2.830	0.497672599793268	3.830	0.499935928370511
1.840	0.467115881340836	2.840	0.497744323308458	3.840	0.499938482844817
1.850	0.467843225204386	2.850	0.497814038545087	3.850	0.499940941087581
1.860	0.468557237019247	2.860	0.497881794959595	3.860	0.499943306487466
1.870	0.469258091070534	2.870	0.497947641005060	3.870	0.499945582323366
1.880	0.469945961038800	2.880	0.498011624145106	3.880	0.499947771767598
1.890	0.470621019959591	2.890	0.498073790867812	3.890	0.499949877889004
1.900	0.471283440183998	2.900	0.498134186699616	3.900	0.499951903655982
1.910	0.471933393340228	2.910	0.498192856219194	3.910	0.499953951939444
1.920	0.472571050296163	2.920	0.498249843071324	3.920	0.499955725515688
1.930	0.473196581122945	2.930	0.498305189980723	3.930	0.499957527069211
1.940	0.473810155059547	2.940	0.498358938765843	3.940	0.499959259195442
1.950	0.4744111940478362	2.950	0.498411130352635	3.950	0.499960924403402
1.960	0.475002104851780	2.960	0.498461804788262	3.960	0.499962525118309
1.970	0.475580814719778	2.970	0.498511001254762	3.970	0.499964063684097
1.980	0.476148235658492	2.980	0.498558758082660	3.980	0.499965542365885
1.990	0.476704532249788	2.990	0.498605112764508	3.990	0.499966963352371
2.000	0.477249868051821	3.000	0.498650101968370	4.000	0.499968328758167

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
4.000	0.499968328758167	5.000	0.499999713348428	6.000	0.499999999013412
4.010	0.499969640626073	5.010	0.499999727849823	6.010	0.499999999072383
4.020	0.499970900929288	5.020	0.499999741642602	6.020	0.499999999127915
4.030	0.499972111573560	5.030	0.499999754760082	6.030	0.499999999180201
4.040	0.499973274399281	5.040	0.499999767234077	6.040	0.499999999229429
4.050	0.499974391183526	5.050	0.499999779094968	6.050	0.499999999275771
4.060	0.499975463642034	5.060	0.499999790371761	6.060	0.499999999319392
4.070	0.499976493431132	5.070	0.499999801092149	6.070	0.499999999360449
4.080	0.499977482149612	5.080	0.499999811282566	6.080	0.499999999399087
4.090	0.499978431340552	5.090	0.499999820968243	6.090	0.499999999435446
4.100	0.499979342493088	5.100	0.499999830173259	6.100	0.499999999469658
4.110	0.499980217044132	5.110	0.499999838920594	6.110	0.499999999501844
4.120	0.499981056380049	5.120	0.499999847232172	6.120	0.499999999532123
4.130	0.499981861838282	5.130	0.499999855128911	6.130	0.499999999560605
4.140	0.499982634708927	5.140	0.499999862630766	6.140	0.499999999587393
4.150	0.499983376236270	5.150	0.499999869756771	6.150	0.499999999612585
4.160	0.499984087620281	5.160	0.499999876525079	6.160	0.499999999636275
4.170	0.499984770018052	5.170	0.499999882953003	6.170	0.499999999658550
4.180	0.499985424545209	5.180	0.499999889057050	6.180	0.499999999679492
4.190	0.499986052277273	5.190	0.499999894852960	6.190	0.499999999699179
4.200	0.499986654250984	5.200	0.499999900355737	6.200	0.499999999717684
4.210	0.499987231465586	5.210	0.499999905579684	6.210	0.499999999735077
4.220	0.499987784884075	5.220	0.499999910538435	6.220	0.499999999751422
4.230	0.499988315434405	5.230	0.499999915244980	6.230	0.499999999766782
4.240	0.499988824010668	5.240	0.499999919711701	6.240	0.499999999781214
4.250	0.499989311474225	5.250	0.499999923950395	6.250	0.499999999794774
4.260	0.499989778654816	5.260	0.499999927972299	6.260	0.499999999807511
4.270	0.499990226351627	5.270	0.499999931788121	6.270	0.499999999819476
4.280	0.4999906655334330	5.280	0.499999935408057	6.280	0.499999999830713
4.290	0.499991066344087	5.290	0.499999938841820	6.290	0.499999999841267
4.300	0.499991460094529	5.300	0.499999942098660	6.300	0.499999999851177
4.310	0.499991837272697	5.310	0.499999945187383	6.310	0.499999999860482
4.320	0.499992198539962	5.320	0.499999948116374	6.320	0.499999999869218
4.330	0.499992544532909	5.330	0.499999950893617	6.330	0.499999999877419
4.340	0.499992875864199	5.340	0.499999953526709	6.340	0.499999999885117
4.350	0.499993193123401	5.350	0.499999956022884	6.350	0.499999999892342
4.360	0.499993496877799	5.360	0.499999958389024	6.360	0.499999999899123
4.370	0.499993787673173	5.370	0.499999960631679	6.370	0.499999999905486
4.380	0.499994066034554	5.380	0.499999962757081	6.380	0.499999999911456
4.390	0.499994332466958	5.390	0.499999964771158	6.390	0.499999999917057
4.400	0.499994587456092	5.400	0.499999966679552	6.400	0.499999999922311
4.410	0.499994831466043	5.410	0.499999968487626	6.410	0.499999999927240
4.420	0.499995064954938	5.420	0.499999970200482	6.420	0.499999999931863
4.430	0.499995288345588	5.430	0.499999971822974	6.430	0.499999999936198
4.440	0.499995502056112	5.440	0.499999973359714	6.440	0.499999999940263
4.450	0.499995706485530	5.450	0.499999974815090	6.450	0.499999999944075
4.460	0.499995902017353	5.460	0.499999976193271	6.460	0.499999999947648
4.470	0.499996089020140	5.470	0.499999977498221	6.470	0.499999999950998
4.480	0.499996267848039	5.480	0.499999978733708	6.480	0.499999999954138
4.490	0.499996438841321	5.490	0.499999979903313	6.490	0.499999999957082
4.500	0.499996602326875	5.500	0.499999981010438	6.500	0.499999999959840

4.510	0.499996758618713	5.510	0.499999982058315	6.510	0.49999999962424
4.520	0.499996908018431	5.520	0.499999983050017	6.520	0.49999999964846
4.530	0.499997050815677	5.530	0.499999983988461	6.530	0.49999999967115
4.540	0.499997187288588	5.540	0.499999984976418	6.540	0.49999999969240
4.550	0.499997317704220	5.550	0.499999985716520	6.550	0.49999999971231
4.560	0.499997442318961	5.560	0.499999986511288	6.560	0.49999999973096
4.570	0.499997561378926	5.570	0.499999987263033	6.570	0.49999999974842
4.580	0.499997675120350	5.580	0.499999987974071	6.580	0.49999999976477
4.590	0.499997783769952	5.590	0.499999988646519	6.590	0.49999999978008
4.600	0.499997887545298	5.600	0.499999989282410	6.600	0.49999999979442
4.610	0.499997986655145	5.610	0.499999989883669	6.610	0.49999999980784
4.620	0.499998081299780	5.620	0.499999990452127	6.620	0.49999999982040
4.630	0.499998171671336	5.630	0.499999990989519	6.630	0.49999999983215
4.640	0.499998257954110	5.640	0.499999991497492	6.640	0.49999999984316
4.650	0.499998340324856	5.650	0.499999991977608	6.650	0.49999999985345
4.660	0.499998418953081	5.660	0.499999992431350	6.660	0.49999999986308
4.670	0.499998494001322	5.670	0.499999992860124	6.670	0.49999999987210
4.680	0.499998565625416	5.680	0.499999993265263	6.680	0.49999999988053
4.690	0.499998633974755	5.690	0.499999993648031	6.690	0.49999999988841
4.700	0.499998699192546	5.700	0.499999994009629	6.700	0.49999999989579
4.710	0.499998761416043	5.710	0.499999994351191	6.710	0.49999999990269
4.720	0.499998820776784	5.720	0.499999994673797	6.720	0.49999999990914
4.730	0.499998877400815	5.730	0.499999994978468	6.730	0.49999999991517
4.740	0.499998931408906	5.740	0.499999995266172	6.740	0.49999999992081
4.750	0.499998982916758	5.750	0.499999995537828	6.750	0.49999999992608
4.760	0.499999032035204	5.760	0.499999995794303	6.760	0.49999999993101
4.770	0.499999078870404	5.770	0.499999996036423	6.770	0.49999999993561
4.780	0.499999123524027	5.780	0.499999996264969	6.780	0.49999999993992
4.790	0.499999168093434	5.790	0.499999996480679	6.790	0.49999999994394
4.800	0.499999206671848	5.800	0.499999996684254	6.800	0.49999999994770
4.810	0.499999245348521	5.810	0.499999996876358	6.810	0.49999999995120
4.820	0.499999282208893	5.820	0.499999997057619	6.820	0.49999999995448
4.830	0.499999317334747	5.830	0.499999997228631	6.830	0.49999999995755
4.840	0.499999350804357	5.840	0.499999997389959	6.840	0.49999999996041
4.850	0.499999382692628	5.850	0.499999997542135	6.850	0.49999999996308
4.860	0.499999413071236	5.860	0.499999997685664	6.860	0.49999999996558
4.870	0.499999442008757	5.870	0.499999997821024	6.870	0.49999999996791
4.880	0.499999469570797	5.880	0.499999997948668	6.880	0.49999999997008
4.890	0.499999495820112	5.890	0.499999998069022	6.890	0.49999999997211
4.900	0.499999520816723	5.900	0.499999998182492	6.900	0.49999999997401
4.910	0.499999544618035	5.910	0.499999998289461	6.910	0.49999999997578
4.920	0.499999567278938	5.920	0.499999998390292	6.920	0.49999999997743
4.930	0.499999588851916	5.930	0.499999998485327	6.930	0.49999999997897
4.940	0.499999609387146	5.940	0.499999998574890	6.940	0.49999999998041
4.950	0.499999628932592	5.950	0.499999998659287	6.950	0.49999999998175
4.960	0.499999647534102	5.960	0.499999998738810	6.960	0.49999999998300
4.970	0.499999665235492	5.970	0.499999998813732	6.970	0.49999999998417
4.980	0.499999682078634	5.980	0.499999998884312	6.980	0.49999999998526
4.990	0.499999698103538	5.990	0.499999998950795	6.990	0.49999999998628
5.000	0.499999713348428	6.000	0.499999999013412	7.000	0.49999999998722

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
7.000	0.499999999998722	8.000	0.500000000000051	9.000	0.49999999999237
7.010	0.499999999998811	8.010	0.500000000000051	9.010	0.49999999999212
7.020	0.499999999998893	8.020	0.500000000000052	9.020	0.49999999999188
7.030	0.499999999998970	8.030	0.500000000000052	9.030	0.49999999999163
7.040	0.499999999999042	8.040	0.500000000000052	9.040	0.49999999999137
7.050	0.499999999999108	8.050	0.500000000000052	9.050	0.49999999999111
7.060	0.499999999999171	8.060	0.500000000000052	9.060	0.49999999999085
7.070	0.499999999999229	8.070	0.500000000000052	9.070	0.49999999999058
7.080	0.499999999999283	8.080	0.500000000000052	9.080	0.49999999999031
7.090	0.499999999999333	8.090	0.500000000000051	9.090	0.49999999999003
7.100	0.499999999999380	8.100	0.500000000000051	9.100	0.49999999998975
7.110	0.499999999999424	8.110	0.500000000000051	9.110	0.49999999998946
7.120	0.499999999999465	8.120	0.500000000000051	9.120	0.49999999998917
7.130	0.499999999999503	8.130	0.500000000000050	9.130	0.49999999998888
7.140	0.499999999999538	8.140	0.500000000000049	9.140	0.49999999998858
7.150	0.499999999999571	8.150	0.500000000000049	9.150	0.49999999998827
7.160	0.499999999999602	8.160	0.500000000000048	9.160	0.49999999998797
7.170	0.499999999999631	8.170	0.500000000000047	9.170	0.49999999998766
7.180	0.499999999999658	8.180	0.500000000000046	9.180	0.49999999998734
7.190	0.499999999999682	8.190	0.500000000000045	9.190	0.49999999998702
7.200	0.499999999999706	8.200	0.500000000000044	9.200	0.49999999998670
7.210	0.499999999999727	8.210	0.500000000000043	9.210	0.49999999998637
7.220	0.499999999999747	8.220	0.500000000000041	9.220	0.49999999998604
7.230	0.499999999999766	8.230	0.500000000000040	9.230	0.49999999998570
7.240	0.499999999999784	8.240	0.500000000000039	9.240	0.49999999998536
7.250	0.499999999999800	8.250	0.500000000000037	9.250	0.49999999998502
7.260	0.499999999999815	8.260	0.500000000000035	9.260	0.49999999998467
7.270	0.499999999999829	8.270	0.500000000000033	9.270	0.49999999998432
7.280	0.499999999999843	8.280	0.500000000000031	9.280	0.49999999998397
7.290	0.499999999999855	8.290	0.500000000000029	9.290	0.49999999998361
7.300	0.499999999999866	8.300	0.500000000000027	9.300	0.49999999998325
7.310	0.499999999999877	8.310	0.500000000000024	9.310	0.49999999998289
7.320	0.499999999999887	8.320	0.500000000000022	9.320	0.49999999998252
7.330	0.499999999999896	8.330	0.500000000000019	9.330	0.49999999998215
7.340	0.499999999999905	8.340	0.500000000000016	9.340	0.49999999998178
7.350	0.499999999999913	8.350	0.500000000000013	9.350	0.49999999998141
7.360	0.499999999999921	8.360	0.500000000000010	9.360	0.49999999998103
7.370	0.499999999999928	8.370	0.500000000000006	9.370	0.49999999998065
7.380	0.499999999999935	8.380	0.500000000000003	9.380	0.49999999998027
7.390	0.499999999999941	8.390	0.499999999999999	9.390	0.49999999997988
7.400	0.499999999999947	8.400	0.499999999999995	9.400	0.49999999997950
7.410	0.499999999999952	8.410	0.499999999999991	9.410	0.49999999997911
7.420	0.499999999999957	8.420	0.499999999999987	9.420	0.49999999997872
7.430	0.499999999999962	8.430	0.499999999999982	9.430	0.49999999997833
7.440	0.499999999999966	8.440	0.499999999999977	9.440	0.49999999997794
7.450	0.499999999999971	8.450	0.499999999999972	9.450	0.49999999997755
7.460	0.499999999999975	8.460	0.499999999999967	9.460	0.49999999997715
7.470	0.499999999999978	8.470	0.499999999999962	9.470	0.49999999997676
7.480	0.499999999999982	8.480	0.499999999999956	9.480	0.49999999997636
7.490	0.499999999999985	8.490	0.499999999999950	9.490	0.49999999997597
7.500	0.499999999999988	8.500	0.499999999999944	9.500	0.49999999997557
7.510	0.499999999999991	8.510	0.499999999999938	9.510	0.49999999997517
7.520	0.499999999999994	8.520	0.499999999999932	9.520	0.49999999997478

7.530	0.499999999999997	8.530	0.499999999999925	9.530	0.499999999997439
7.540	0.499999999999999	8.540	0.499999999999918	9.540	0.499999999997399
7.550	0.500000000000002	8.550	0.499999999999911	9.550	0.499999999997360
7.560	0.500000000000004	8.560	0.499999999999903	9.560	0.499999999997321
7.570	0.500000000000006	8.570	0.499999999999895	9.570	0.499999999997282
7.580	0.500000000000008	8.580	0.499999999999887	9.580	0.499999999997244
7.590	0.500000000000010	8.590	0.499999999999879	9.590	0.499999999997205
7.600	0.500000000000012	8.600	0.499999999999870	9.600	0.499999999997167
7.610	0.500000000000014	8.610	0.499999999999862	9.610	0.499999999997129
7.620	0.500000000000015	8.620	0.499999999999852	9.620	0.499999999997091
7.630	0.500000000000017	8.630	0.499999999999843	9.630	0.499999999997054
7.640	0.500000000000019	8.640	0.499999999999833	9.640	0.499999999997017
7.650	0.500000000000020	8.650	0.499999999999823	9.650	0.499999999996981
7.660	0.500000000000022	8.660	0.499999999999812	9.660	0.499999999996945
7.670	0.500000000000023	8.670	0.499999999999802	9.670	0.499999999996909
7.680	0.500000000000025	8.680	0.499999999999791	9.680	0.499999999996874
7.690	0.500000000000026	8.690	0.499999999999779	9.690	0.499999999996840
7.700	0.500000000000027	8.700	0.499999999999767	9.700	0.499999999996806
7.710	0.500000000000029	8.710	0.499999999999755	9.710	0.499999999996773
7.720	0.500000000000030	8.720	0.499999999999743	9.720	0.499999999996740
7.730	0.500000000000031	8.730	0.499999999999730	9.730	0.499999999996709
7.740	0.500000000000032	8.740	0.499999999999717	9.740	0.499999999996678
7.750	0.500000000000033	8.750	0.499999999999704	9.750	0.499999999996647
7.760	0.500000000000034	8.760	0.499999999999689	9.760	0.499999999996618
7.770	0.500000000000035	8.770	0.499999999999675	9.770	0.499999999996589
7.780	0.500000000000036	8.780	0.499999999999661	9.780	0.499999999996562
7.790	0.500000000000037	8.790	0.499999999999646	9.790	0.499999999996535
7.800	0.500000000000038	8.800	0.499999999999630	9.800	0.499999999996510
7.810	0.500000000000039	8.810	0.499999999999615	9.810	0.499999999996485
7.820	0.500000000000040	8.820	0.499999999999598	9.820	0.499999999996462
7.830	0.500000000000041	8.830	0.499999999999582	9.830	0.499999999996440
7.840	0.500000000000042	8.840	0.499999999999565	9.840	0.499999999996418
7.850	0.500000000000043	8.850	0.499999999999547	9.850	0.499999999996399
7.860	0.500000000000044	8.860	0.499999999999530	9.860	0.499999999996380
7.870	0.500000000000044	8.870	0.499999999999512	9.870	0.499999999996363
7.880	0.500000000000045	8.880	0.499999999999493	9.880	0.499999999996348
7.890	0.500000000000046	8.890	0.499999999999474	9.890	0.499999999996334
7.900	0.500000000000046	8.900	0.499999999999455	9.900	0.499999999996321
7.910	0.500000000000047	8.910	0.499999999999435	9.910	0.499999999996310
7.920	0.500000000000047	8.920	0.499999999999414	9.920	0.499999999996301
7.930	0.500000000000048	8.930	0.499999999999394	9.930	0.499999999996293
7.940	0.500000000000049	8.940	0.499999999999373	9.940	0.499999999996288
7.950	0.500000000000049	8.950	0.499999999999351	9.950	0.499999999996284
7.960	0.500000000000050	8.960	0.499999999999329	9.960	0.499999999996282
7.970	0.500000000000050	8.970	0.499999999999307	9.970	0.499999999996281
7.980	0.500000000000051	8.980	0.499999999999284	9.980	0.499999999996283
7.990	0.500000000000051	8.990	0.499999999999260	9.990	0.499999999996288
8.000	0.500000000000051	9.000	0.499999999999237	10.00	0.499999999996294

## ДОДАТОК В (обов'язковий)

### СТАТТЯ У ФАХОВОМУ ЖУРНАЛІ

УДК 621.396.12

В.І. ЛУЖАНСЬКИЙ, Д.А. МАКАРИШКІН, Т.Л. ГОНЧАРУК

Хмельницької національної університет

#### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ КАНАЛУ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ТАЙМЕРНИХ СИГНАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

*В розрядно-цифровому способі кодування інформація про переданий розряд визначається видом сигналу на одиничному (найквістовому) інтервалі. В таймерних сигнальних конструкціях (ТСК), на відміну від розрядно-цифрового способу кодування, інформацію закладено у привласнених декількох окремих часових відрізках сигналу на інтервалі конструкції і даному власному положенні. З метою зменшення міжсимвольних спотворень, привласність часових відрізків складає не менше найквістового інтервалу. Часовий відрізок показує частину одиничного елемента і визначається завадами у каналі зв'язку та припустимою ймовірністю помилкового приймання сигнальної конструкції.*

*В науковій статті проведено дослідження ефективності використання таймерних сигнальних конструкцій для збільшення пропускної здатності каналу зв'язку в залежності від завадостійкості та інформаційних параметрів таймерних сигнальних конструкцій.*

*Ключові слова: таймерна сигнальна конструкція, інформація, завадостійкість, найквістовий елемент, значущі моменти модуляції, число реалізацій таймерних сигнальних конструкцій, пропускна здатність каналу зв'язку.*

V.I. LUZHANSKY, D. A. MAKARUSHKIN, T. L. HONCHARUK

Khmelnytsky National University

#### INVESTIGATION OF CHANNEL PERFORMANCE DEPENDING ON DIFFICULTY AND INFORMATION PARAMETERS OF TIMER SIGNAL STRUCTURES

*In the bit-digital encoding method, the information about the transmitted bit is determined by the type of signal on a single (quest) interval. In timer signal constructions (TSCs), in contrast to the bit-digital encoding method, the information is laid down in the durations of several separate time segments of the signal on the design interval and their relative position. In order to reduce inter-character distortion, the duration of time intervals is at least the most quiz interval. The time interval shows the part of a single element and is determined by the interference in the communication channel and the allowable probability of erroneous reception of the signal structure.*

*The reason for the increase in channel bandwidth when using TSC is the importance of creating more signal structures at a given time interval than when using bit-digit code.*

*Increasing the bandwidth of the communication channel leads to an increase in the transmission rate of digital information flows at a given communication quality.*

*In the scientific article the research of efficiency of use of timer signal designs for increase in throughput of the communication channel depending on noise immunity and information parameters of timer signal designs is carried out.*

*Keywords: timer signal construction, information, noise immunity, quest element, significant modulation moments, number of realizations of timer signal constructions, communication channel bandwidth.*

#### Вступ

У таймерних сигнальних конструкціях інформація про переданий символ закладена не в значеннях окремих двійкових цифр кодового числа, а в місцях знаходження значущих моментів модуляції (ЗММ) і на інтервалі формування сигнальних конструкцій. Причина збільшення пропускної здатності каналу при використанні ТСК – важливість створення на заданому часовому інтервалі більше сигнальних конструкцій, ніж при використанні розрядно-цифрового коду.

Збільшення пропускної здатності каналу зв'язку призводить до зростання швидкості передачі цифрових потоків інформації при заданій якості зв'язку.

Метою наукової статті є оцінка ефективності використання таймерних сигнальних конструкцій для збільшення пропускної здатності каналу зв'язку.

#### Результати дослідження.

Потужність реалізованого ансамблю  $N_{PT}$  на інтервалі  $T_{СК} = m \cdot t_0$  визначається наступним виразом:

$$N_{PT} = \frac{(ms - i(s-1))!}{i!(ms - is)!}, \quad (1)$$

де  $i$  – число заданих відрізків сигналу на інтервалі кодового слова довжиною  $m$  найквістових елементів;  $\Delta$  – частина елемента  $t_0 = (\Delta = t_0/s)$ ,  $s \in (2; 3; \dots; 50)$  – цілі числа, яка забезпечує розпізнавальну здатність тривалостей окремих відрізків із заданою ймовірністю помилки на виході каналу зв'язку.

Наприклад, для  $m = 7$  і  $s = 6$  при синтезі сигнальної конструкції з п'яти інформаційних відрізків ( $i = 5$ ):

$$N_{PT} = \frac{17!}{5!12!} = 6188.$$

У таблицях 1-8 наведено число реалізацій ТСК, які розраховані при різних значеннях  $m$  ( $m \in 2 \div 15$ ) для  $i=1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8$ ;  $s \in 2 \div 20$  (рис.1).

Із таблиць 1-8 випливає:

- 1) число реалізацій ТСК  $N_{PT}$  зростає зі збільшенням параметрів  $m$  і  $s$ ;
- 2) при  $i = m$  можлива тільки одна реалізація ( $N_{PT} = 1$ );
- 3) при  $i < m$  число реалізацій  $N_{PT} = 0$ .

На основі таблиці 2 подано залежності тривалості сигнальних конструкцій за заданої потужності кодових множин і параметра  $s$ .

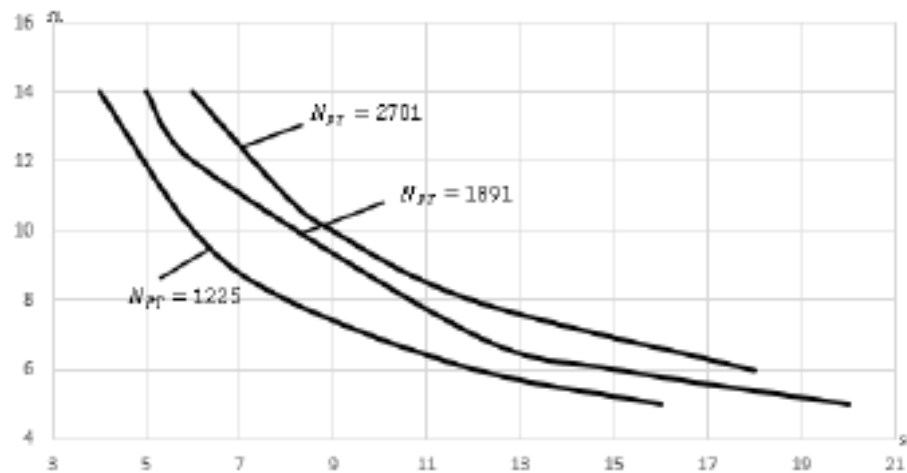


Рис. 1. Залежності  $m = f(s)$  при  $N = const$

Далі, на основі даних взятих з таблиці 5, було проведено дослідження залежності пропускної здатності каналів з різним рівнем флуктуаційних шумів за наступними формулами:

- значення пропускної здатності каналу зв'язку:

$$C_m = \frac{1}{m} \cdot (\log_2 N_{PT} - H_{BT}), \quad (2)$$

де  $H_{BT}$  – визначає втрати в каналі через невизначеність у прийманні кодової сигнальної конструкції.

Таблиця 1

⊕ Число реалізацій ТСК при  $m \in 2 \div 15$  для  $i=1$   $s \in 2 \div 20$

$i$	$S$	$m$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		$2^m$	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384	32768
1	2	$N_{PR}$	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29
	3	$N_{PR}$	4	7	10	13	16	19	22	25	28	31	34	37	40	43
	4	$N_{PR}$	5	9	13	17	21	25	29	33	37	41	45	49	53	57
	5	$N_{PR}$	6	11	16	21	26	31	36	41	46	51	56	61	66	71
	6	$N_{PR}$	7	13	19	25	31	37	43	49	55	61	67	73	79	85
	7	$N_{PR}$	8	15	22	29	36	43	50	57	64	71	78	85	92	99
	8	$N_{PR}$	9	17	25	33	41	49	57	65	73	81	89	97	105	113
	9	$N_{PR}$	10	19	28	37	46	55	64	73	82	91	100	109	118	127
	10	$N_{PR}$	11	21	31	41	51	61	71	81	91	101	111	121	131	141
	11	$N_{PR}$	12	23	34	45	56	67	78	89	100	111	122	133	144	155
	12	$N_{PR}$	13	25	37	49	61	73	85	97	109	121	133	145	157	169
	13	$N_{PR}$	14	27	40	53	66	79	92	105	118	131	144	157	170	183
	14	$N_{PR}$	15	29	43	57	71	85	99	113	127	141	155	169	183	197
	15	$N_{PR}$	16	31	46	61	76	91	106	121	136	151	166	181	196	211
	16	$N_{PR}$	17	33	49	65	81	97	113	129	145	161	177	193	209	225
	17	$N_{PR}$	18	35	52	69	86	103	120	137	154	171	188	205	222	239
	18	$N_{PR}$	19	37	55	73	91	109	127	145	163	181	199	217	235	253
	19	$N_{PR}$	20	39	58	77	96	115	134	153	172	191	210	229	248	267
	20	$N_{PR}$	21	41	61	81	101	121	141	161	181	201	221	241	261	281

Таблиця 2

Число реалізацій ТСК при  $m \in 2 \div 15$  для  $i=2$   $s \in 2 \div 20$

$i$	$S$	$m$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		$2^m$	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384	32768
2	2	$N_{PR}$	1	6	15	28	45	66	91	120	153	190	231	276	325	378
	3	$N_{PR}$	1	10	28	55	91	136	190	253	325	406	496	595	703	820
	4	$N_{PR}$	1	15	45	91	153	231	325	435	561	703	861	1035	1225	1431
	5	$N_{PR}$	1	21	66	136	231	351	496	666	861	1081	1326	1596	1891	2211
	6	$N_{PR}$	1	28	91	190	325	496	703	946	1225	1540	1891	2278	2701	3160
	7	$N_{PR}$	1	36	120	253	435	666	946	1275	1653	2080	2556	3081	3655	4278
	8	$N_{PR}$	1	45	153	325	561	861	1225	1653	2145	2701	3321	4005	4753	5565
	9	$N_{PR}$	1	55	190	406	703	1081	1540	2080	2701	3403	4186	5050	5995	7021
	10	$N_{PR}$	1	66	231	496	861	1326	1891	2556	3321	4186	5151	6216	7381	8646
	11	$N_{PR}$	1	78	276	595	1035	1596	2278	3081	4005	5050	6216	7503	8911	10440
	12	$N_{PR}$	1	91	325	703	1225	1891	2701	3653	4753	5993	7381	8911	10583	12403
	13	$N_{PR}$	1	105	378	820	1431	2211	3160	4278	5565	7021	8646	10440	12403	14533
	14	$N_{PR}$	1	120	435	946	1653	2556	3653	4950	6441	8128	10011	12090	14365	16868
	15	$N_{PR}$	1	136	496	1081	1891	2926	4186	5671	7381	9316	11476	13861	16700	19230
	16	$N_{PR}$	1	153	561	1225	2145	3321	4753	6441	8385	10583	13041	15732	18865	21991
	17	$N_{PR}$	1	171	630	1378	2415	3741	5356	7260	9453	11953	14669	17632	21211	24801
	18	$N_{PR}$	1	190	703	1540	2701	4186	5995	8128	10583	13366	16700	19898	23700	27876
	19	$N_{PR}$	1	210	780	1711	3003	4636	6670	9043	11781	14800	18336	22123	26394	30861
	20	$N_{PR}$	1	231	861	1891	3321	5131	7381	10011	13041	16471	20304	24561	29187	34203

Таблиця 3

Число реалізацій ТСК при  $m \in 2 \div 15$  для  $i=3$   $s \in 2 \div 20$

$i$	$S$	$m$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		$2^m$	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384	32768
3	2	$N_{PR}$	0	1	10	35	84	165	286	455	680	969	1330	1771	2300	2925
	3	$N_{PR}$	0	1	20	84	220	455	816	1330	2024	2925	4060	5456	7140	9139
	4	$N_{PR}$	0	1	35	165	455	969	1771	2925	4495	6545	9139	12341	16213	20825
	5	$N_{PR}$	0	1	56	286	816	1771	3276	5456	8436	12341	17296	23426	30856	39711
	6	$N_{PR}$	0	1	84	455	1330	2925	5456	9139	14190	20825	29260	39711	52394	67525
	7	$N_{PR}$	0	1	120	680	2024	4495	8436	14190	22100	32309	45760	62196	82160	105993
	8	$N_{PR}$	0	1	165	969	2925	6545	12341	20825	32309	47905	67525	91881	121485	156849
	9	$N_{PR}$	0	1	220	1330	4060	9139	17296	29260	45760	67525	95284	129766	171700	221815
	10	$N_{PR}$	0	1	286	1771	5456	12341	23436	39711	62196	91881	129766	176851	234136	302621
	11	$N_{PR}$	0	1	364	2300	7140	16213	30856	52394	82160	121485	171700	234136	310124	400995
	12	$N_{PR}$	0	1	455	2925	9139	20825	39711	67525	105995	156849	221815	302621	400995	518665
	13	$N_{PR}$	0	1	560	3634	11480	26235	50116	83320	134044	198483	280840	383306	508080	657339
	14	$N_{PR}$	0	1	680	4495	14190	32309	62196	105995	166650	246905	349304	477191	632710	820103
	15	$N_{PR}$	0	1	816	5456	17296	39711	76076	129766	204136	302621	428536	585276	776216	1003316
	16	$N_{PR}$	0	1	969	6545	20825	47905	91881	156849	246905	366145	518665	708361	934343	1212346
	17	$N_{PR}$	0	1	1140	7770	24804	57135	109736	187460	293240	437989	620620	847107	1128203	1464646
	18	$N_{PR}$	0	1	1330	9139	29260	67525	129766	221815	349304	518665	735130	1003316	1329966	1733333
	19	$N_{PR}$	0	1	1540	10660	34220	79079	152096	260130	410040	608683	862903	1179407	1564133	2029478
	20	$N_{PR}$	0	1	1771	12341	39711	91881	176851	302621	477191	708361	1003316	1374788	1827483	2358722

Таблица 4

Число реализаций ТСК при  $m \in 2 \div 15$  для  $i=4$   $s \in 2 \div 20$ 

$i$	$S$	$m$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
			$2^m$	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384
4	2	$N_{PT}$	0	0	1	15	70	210	495	1001	1820	3060	4845	7315	10626	14950
	3	$N_{PT}$	0	0	1	35	210	715	1820	3876	7315	12650	20475	31465	46376	66045
	4	$N_{PT}$	0	0	1	70	495	1820	4845	10626	20475	35960	58905	91390	135751	194580
	5	$N_{PT}$	0	0	1	126	1001	3876	10626	23751	46376	82251	135751	211876	316251	455126
	6	$N_{PT}$	0	0	1	210	1820	7315	20475	46376	91390	163185	270725	424270	635376	916895
	7	$N_{PT}$	0	0	1	330	3060	12650	35960	82251	163185	292825	487635	766480	1150626	1663740
	8	$N_{PT}$	0	0	1	495	4845	20475	58905	135751	270725	487635	814385	1282975	1929501	2794153
	9	$N_{PT}$	0	0	1	715	7315	31465	91390	211876	424270	766480	1282975	2024785	3049501	4421275
	10	$N_{PT}$	0	0	1	1001	10626	46376	135751	316251	635376	1150626	1929501	3049501	4598126	6672876
	11	$N_{PT}$	0	0	1	1365	14950	66045	194580	455126	916895	1663740	2794153	4421275	6672876	9691375
	12	$N_{PT}$	0	0	1	1820	20475	91390	270725	635376	1282975	2331890	3921225	6210820	9381251	13633830
	13	$N_{PT}$	0	0	1	2380	27405	123410	367290	864501	1740060	3183545	5359095	8495410	12840751	18671940
	14	$N_{PT}$	0	0	1	3090	35960	163185	487635	1150626	2331890	4249575	7160245	11358880	17178876	24902045
	15	$N_{PT}$	0	0	1	3876	46376	211876	635376	1502501	3049501	5563251	9381251	14891626	22533126	32795126
	16	$N_{PT}$	0	0	1	4845	58905	270725	814385	1929501	3921225	7160245	12082785	19190665	29051001	42292797
	17	$N_{PT}$	0	0	1	5985	73815	341055	1028790	2441626	4967690	9078630	15329615	24359335	36845730	53004428
	18	$N_{PT}$	0	0	1	7315	91390	424270	1282975	3049501	6210820	11358880	19190665	30507895	46227197	67340067
	19	$N_{PT}$	0	0	1	8855	111900	521855	1581580	3764376	7673835	14043870	23738715	37634408	57248622	83498677
	20	$N_{PT}$	0	0	1	10626	135751	635376	1929501	4598126	9381251	17178876	29051001	46227197	69796954	1.02 · 10 <sup>8</sup>

Таблица 5

Число реализаций ТСК при  $m \in 2 \div 15$  для  $i=5$   $s \in 2 \div 20$ 

$i$	$S$	$m$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
			$2^m$	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384
5	2	$N_{PT}$	0	0	0	1	21	126	462	1287	3003	6188	11628	20349	33649	51130
	3	$N_{PT}$	0	0	0	1	56	462	2002	6188	15504	33649	65780	118755	201376	324632
	4	$N_{PT}$	0	0	0	1	126	1287	6188	20349	53130	118755	237336	435897	749398	1221759
	5	$N_{PT}$	0	0	0	1	252	3003	15504	53130	142306	324632	658008	1221759	2118760	3478761
	6	$N_{PT}$	0	0	0	1	462	6188	33649	118755	324632	749398	1533939	2869685	5006386	8259888
	7	$N_{PT}$	0	0	0	1	792	11628	65780	237336	658008	1533939	3162510	5949147	10424128	17259390
	8	$N_{PT}$	0	0	0	1	1287	20349	118755	435897	1221759	2869685	5949147	11238513	19757815	32801517
	9	$N_{PT}$	0	0	0	1	2002	33649	201376	749398	2118760	5006386	10424128	19757815	34826302	57940519
	10	$N_{PT}$	0	0	0	1	3003	53130	324632	1221759	3478761	8259888	17259390	32801517	57940519	96560646
	11	$N_{PT}$	0	0	0	1	4368	80730	501942	1906884	5461512	13019909	27285336	51971283	91962520	1.53 · 10 <sup>8</sup>
	12	$N_{PT}$	0	0	0	1	6188	118755	749398	2869685	8259888	19757815	41507642	79208745	1.4 · 10 <sup>8</sup>	2.35 · 10 <sup>8</sup>
	13	$N_{PT}$	0	0	0	1	8568	169911	1086008	4187106	12103014	29034396	61124064	1.17 · 10 <sup>8</sup>	2.07 · 10 <sup>8</sup>	3.47 · 10 <sup>8</sup>
	14	$N_{PT}$	0	0	0	1	11628	237336	1533939	5949147	17259390	41507642	87541245	1.68 · 10 <sup>8</sup>	2.98 · 10 <sup>8</sup>	4.98 · 10 <sup>8</sup>
	15	$N_{PT}$	0	0	0	1	15504	324632	2118760	8259888	24040016	57940519	1.22 · 10 <sup>8</sup>	2.35 · 10 <sup>8</sup>	4.17 · 10 <sup>8</sup>	6.99 · 10 <sup>8</sup>
	16	$N_{PT}$	0	0	0	1	20349	435897	2869685	11238513	32801517	79208745	1.68 · 10 <sup>8</sup>	3.21 · 10 <sup>8</sup>	5.72 · 10 <sup>8</sup>	9.59 · 10 <sup>8</sup>
	17	$N_{PT}$	0	0	0	1	26334	575757	3819816	15020334	43949268	1.06 · 10 <sup>8</sup>	2.25 · 10 <sup>8</sup>	4.32 · 10 <sup>8</sup>	7.7 · 10 <sup>8</sup>	1.28 · 10 <sup>9</sup>
	18	$N_{PT}$	0	0	0	1	33649	749398	5006386	19757815	57940519	1.4 · 10 <sup>8</sup>	2.98 · 10 <sup>8</sup>	5.72 · 10 <sup>8</sup>	1.02 · 10 <sup>9</sup>	1.7 · 10 <sup>9</sup>
	19	$N_{PT}$	0	0	0	1	42504	962598	6471002	25621596	75287520	1.83 · 10 <sup>8</sup>	3.88 · 10 <sup>8</sup>	7.45 · 10 <sup>8</sup>	1.33 · 10 <sup>9</sup>	2.23 · 10 <sup>9</sup>
	20	$N_{PT}$	0	0	0	1	53130	1221759	8259888	32801517	96560646	2.35 · 10 <sup>8</sup>	4.98 · 10 <sup>8</sup>	9.59 · 10 <sup>8</sup>	1.7 · 10 <sup>9</sup>	2.87 · 10 <sup>9</sup>

Таблица 6

Число реализаций ТСК при  $m \in 2 \div 15$  для  $i=6$   $s \in 2 \div 20$ 

$i$	$S$	$m$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
			$2^m$	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384
6	2	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	28	210	924	3003	8008	18564	38760	74613	134596
	3	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	84	924	5005	18564	54264	134596	296910	593775	1107568
	4	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	210	3003	18564	74613	230230	593775	1344904	2760681	5245786
	5	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	462	8008	54264	230230	736281	1947792	4496388	9366819	18009460
	6	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	924	18564	134596	593775	1947792	5245786	12271512	25827165	50063860
	7	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	1716	38760	296010	1344904	4496388	12271512	28989675	61474519	1.2 · 10 <sup>9</sup>
	8	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	3003	74613	593775	2760681	9366819	25827165	61474519	1.31 · 10 <sup>9</sup>	2.57 · 10 <sup>9</sup>
	9	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	5005	134596	1107568	5245786	18009460	50063860	1.2 · 10 <sup>9</sup>	2.57 · 10 <sup>9</sup>	5.05 · 10 <sup>9</sup>
	10	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	8008	230230	1947792	9366819	32468436	90858768	2.19 · 10 <sup>9</sup>	4.7 · 10 <sup>9</sup>	9.27 · 10 <sup>9</sup>
	11	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	12376	376740	3262623	15890700	5525372	1.56 · 10 <sup>9</sup>	3.77 · 10 <sup>9</sup>	8.14 · 10 <sup>9</sup>	1.61 · 10 <sup>10</sup>
	12	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	18564	593775	5245786	25827165	90858768	2.57 · 10 <sup>9</sup>	6.23 · 10 <sup>9</sup>	1.35 · 10 <sup>10</sup>	2.67 · 10 <sup>10</sup>
	13	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	27132	906192	8145060	40475338	1.43 · 10 <sup>9</sup>	4.06 · 10 <sup>9</sup>	9.88 · 10 <sup>9</sup>	2.14 · 10 <sup>10</sup>	4.25 · 10 <sup>10</sup>
	14	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	38760	1344904	12271512	61474519	2.19 · 10 <sup>9</sup>	6.23 · 10 <sup>9</sup>	1.32 · 10 <sup>10</sup>	3.3 · 10 <sup>10</sup>	6.55 · 10 <sup>10</sup>
	15	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	54264	1947792	18009460	90858768	3.25 · 10 <sup>9</sup>	9.27 · 10 <sup>9</sup>	2.26 · 10 <sup>10</sup>	4.93 · 10 <sup>10</sup>	9.8 · 10 <sup>10</sup>
	16	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	74613	2760681	25827165	1.31 · 10 <sup>9</sup>	4.7 · 10 <sup>9</sup>	1.35 · 10 <sup>10</sup>	3.3 · 10 <sup>10</sup>	7.18 · 10 <sup>10</sup>	1.43 · 10 <sup>11</sup>
	17	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	100947	3838380	36288252	1.85 · 10 <sup>9</sup>	6.67 · 10 <sup>9</sup>	1.91 · 10 <sup>10</sup>	4.69 · 10 <sup>10</sup>	1.02 · 10 <sup>11</sup>	2.04 · 10 <sup>11</sup>
	18	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	134596	5245786	50063860	2.57 · 10 <sup>9</sup>	9.27 · 10 <sup>9</sup>	2.67 · 10 <sup>10</sup>	6.35 · 10 <sup>10</sup>	1.43 · 10 <sup>11</sup>	2.85 · 10 <sup>11</sup>
	19	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	177100	7059052	67945521	3.5 · 10 <sup>9</sup>	1.27 · 10 <sup>10</sup>	3.65 · 10 <sup>10</sup>	8.98 · 10 <sup>10</sup>	1.96 · 10 <sup>11</sup>	3.92 · 10 <sup>11</sup>
	20	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	230230	9366819	90858768	4.7 · 10 <sup>9</sup>	1.71 · 10 <sup>10</sup>	4.93 · 10 <sup>10</sup>	1.21 · 10 <sup>11</sup>	2.65 · 10 <sup>11</sup>	5.3 · 10 <sup>11</sup>

Таблиця 7

Число реалізацій ТСК при  $m \in 2 \div 15$  для  $i=7$   $s \in 2 \div 20$ 

$i$	$S$	$m$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
			$2^m$	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384
7	2	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	36	330	1716	6435	19448	50388	116280	245157
	3	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	120	1716	11440	50388	170544	480700	1184040	2629575
	4	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	330	6434	50388	245157	888030	2629575	6724520	15380937
	5	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	792	19448	170544	888030	3365856	10295472	26978328	62891499
	6	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	1716	30388	480700	2629575	10295472	32224114	85900584	2,03 · 10 <sup>8</sup>
	7	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	3432	116280	1184040	6724520	26978328	85900584	2,32 · 10 <sup>8</sup>	5,53 · 10 <sup>8</sup>
	8	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	6435	245157	2629575	15380937	62891499	2,03 · 10 <sup>8</sup>	5,53 · 10 <sup>8</sup>	1,33 · 10 <sup>9</sup>
	9	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	11440	480700	5379616	32224114	1,34 · 10 <sup>8</sup>	4,36 · 10 <sup>8</sup>	1,2 · 10 <sup>9</sup>	2,9 · 10 <sup>9</sup>
	10	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	19448	888030	10295472	62891499	2,64 · 10 <sup>8</sup>	8,7 · 10 <sup>8</sup>	2,4 · 10 <sup>9</sup>	5,84 · 10 <sup>9</sup>
	11	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	31824	1560780	18643560	1,16 · 10 <sup>9</sup>	4,92 · 10 <sup>9</sup>	1,63 · 10 <sup>10</sup>	4,53 · 10 <sup>10</sup>	1,11 · 10 <sup>11</sup>
	12	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	50388	2629275	32224114	2,03 · 10 <sup>8</sup>	8,7 · 10 <sup>8</sup>	2,9 · 10 <sup>9</sup>	8,09 · 10 <sup>9</sup>	1,98 · 10 <sup>10</sup>
	13	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	77520	4272048	53524680	3,41 · 10 <sup>9</sup>	1,47 · 10 <sup>9</sup>	4,94 · 10 <sup>9</sup>	1,38 · 10 <sup>10</sup>	3,4 · 10 <sup>10</sup>
	14	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	116280	6724520	85900584	5,53 · 10 <sup>8</sup>	2,4 · 10 <sup>9</sup>	8,09 · 10 <sup>9</sup>	2,28 · 10 <sup>10</sup>	5,6 · 10 <sup>10</sup>
	15	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	170544	10295472	1,34 · 10 <sup>8</sup>	8,7 · 10 <sup>8</sup>	3,8 · 10 <sup>9</sup>	1,28 · 10 <sup>10</sup>	3,62 · 10 <sup>10</sup>	8,94 · 10 <sup>10</sup>
	16	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	245157	15380937	2,03 · 10 <sup>8</sup>	1,33 · 10 <sup>9</sup>	5,84 · 10 <sup>9</sup>	1,98 · 10 <sup>10</sup>	5,6 · 10 <sup>10</sup>	1,38 · 10 <sup>11</sup>
	17	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	346104	22481940	3,01 · 10 <sup>9</sup>	1,98 · 10 <sup>9</sup>	8,76 · 10 <sup>9</sup>	2,98 · 10 <sup>10</sup>	8,44 · 10 <sup>10</sup>	2,09 · 10 <sup>11</sup>
	18	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	480700	32224114	4,36 · 10 <sup>9</sup>	2,9 · 10 <sup>9</sup>	1,28 · 10 <sup>10</sup>	4,38 · 10 <sup>10</sup>	1,24 · 10 <sup>11</sup>	3,08 · 10 <sup>11</sup>
	19	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	657800	45379620	6,21 · 10 <sup>9</sup>	4,15 · 10 <sup>9</sup>	1,85 · 10 <sup>10</sup>	6,31 · 10 <sup>10</sup>	1,8 · 10 <sup>11</sup>	4,46 · 10 <sup>11</sup>
	20	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	888030	62891499	8,7 · 10 <sup>9</sup>	5,84 · 10 <sup>9</sup>	2,61 · 10 <sup>10</sup>	8,94 · 10 <sup>10</sup>	2,55 · 10 <sup>11</sup>	6,33 · 10 <sup>11</sup>

Таблиця 8

Число реалізацій ТСК при  $m \in 2 \div 15$  для  $i=8$   $s \in 2 \div 20$ 

$i$	$S$	$m$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
			$2^m$	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384
8	2	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	45	495	3003	12870	43758	125970	319770
	3	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	165	3003	24310	125970	490314	1562275	4292145
	4	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	495	12870	125970	735471	3108105	10518300	30260340
	5	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	1287	43758	490314	3108104	13884156	48903492	1,45 · 10 <sup>8</sup>
	6	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	3003	125970	1562275	10518300	48903492	1,77 · 10 <sup>8</sup>	5,37 · 10 <sup>8</sup>
	7	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	6435	319770	4292145	30260340	1,45 · 10 <sup>8</sup>	5,37 · 10 <sup>8</sup>	1,65 · 10 <sup>9</sup>
	8	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	12870	735471	10518300	76904685	3,77 · 10 <sup>8</sup>	1,42 · 10 <sup>9</sup>	4,43 · 10 <sup>9</sup>
	9	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	24510	1562275	23535820	1,77 · 10 <sup>8</sup>	8,86 · 10 <sup>8</sup>	3,38 · 10 <sup>9</sup>	1,06 · 10 <sup>10</sup>
	10	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	43758	3108105	48903492	3,77 · 10 <sup>8</sup>	1,92 · 10 <sup>9</sup>	7,39 · 10 <sup>9</sup>	2,34 · 10 <sup>10</sup>
	11	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	75582	3852925	95548245	7,53 · 10 <sup>8</sup>	3,87 · 10 <sup>9</sup>	1,51 · 10 <sup>10</sup>	4,81 · 10 <sup>10</sup>
	12	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	125970	10518300	1,77 · 10 <sup>8</sup>	1,42 · 10 <sup>9</sup>	7,39 · 10 <sup>9</sup>	2,9 · 10 <sup>10</sup>	9,31 · 10 <sup>10</sup>
	13	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	203490	18156204	3,14 · 10 <sup>9</sup>	2,56 · 10 <sup>9</sup>	1,34 · 10 <sup>10</sup>	5,31 · 10 <sup>10</sup>	1,71 · 10 <sup>11</sup>
	14	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	319770	30260340	5,37 · 10 <sup>8</sup>	4,43 · 10 <sup>9</sup>	2,34 · 10 <sup>10</sup>	9,51 · 10 <sup>10</sup>	3,02 · 10 <sup>11</sup>
	15	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	490314	48903492	8,86 · 10 <sup>8</sup>	7,39 · 10 <sup>9</sup>	3,94 · 10 <sup>10</sup>	1,57 · 10 <sup>11</sup>	5,12 · 10 <sup>11</sup>
	16	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	735471	76904685	1,42 · 10 <sup>9</sup>	1,2 · 10 <sup>9</sup>	6,43 · 10 <sup>10</sup>	2,58 · 10 <sup>11</sup>	8,4 · 10 <sup>11</sup>
	17	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	1081375	1,18 · 10 <sup>9</sup>	2,22 · 10 <sup>9</sup>	1,89 · 10 <sup>10</sup>	1,02 · 10 <sup>11</sup>	4,1 · 10 <sup>11</sup>	1,34 · 10 <sup>12</sup>
	18	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	1562275	1,77 · 10 <sup>9</sup>	3,38 · 10 <sup>9</sup>	2,9 · 10 <sup>9</sup>	1,57 · 10 <sup>10</sup>	6,35 · 10 <sup>10</sup>	2,08 · 10 <sup>11</sup>
	19	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	2220075	2,61 · 10 <sup>9</sup>	3,05 · 10 <sup>9</sup>	4,36 · 10 <sup>10</sup>	2,38 · 10 <sup>10</sup>	9,63 · 10 <sup>10</sup>	3,17 · 10 <sup>11</sup>
	20	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	0	1	3108105	3,77 · 10 <sup>9</sup>	7,39 · 10 <sup>9</sup>	6,43 · 10 <sup>10</sup>	3,52 · 10 <sup>11</sup>	1,43 · 10 <sup>12</sup>	4,71 · 10 <sup>12</sup>

$$H_{BT} = - \left[ P_B \cdot \log_2 P_B + (1 - P_B) \cdot \log_2 \frac{1 - P_B}{N_{PT} - 1} \right], \quad (3)$$

де  $P_B$  – ймовірність вірного приймання сигнальної конструкції з  $i$ -переходами:

$$P_B = \left[ 2\Phi \left( \frac{\Delta_{\text{опт}}}{2 \cdot \sigma_K} \right) \right]^i, \quad (4)$$

де  $\Delta_{\text{опт}} = (3,8 \dots 5,5)$ ;  $\Phi(x)$  – інтеграл ймовірностей:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_0^x e^{-z^2/2} dz. \quad (5)$$

Середнє число моментів модуляції дорівнює:

$$\bar{i} = \sum_{i=1}^m P[N_P(i)]i \quad (6)$$

$$P[N_P(i)] = \frac{N_P}{N_{P\Sigma}}$$

Середньоквадратичне відхилення зміщення фронту сигналу на виході каналу:

$$\sigma_K = \frac{4}{h}, \quad (7)$$

де  $h$ -відношення сигнал/завада,  $h=U_s/U_z$ .

Граничне значення пропускної здатності каналу зв'язку буде визначатися виразом:

$$C_{\max} = \frac{\log_2 N_P \Sigma}{T_{CK}}, \quad (8)$$

де  $N_{P\Sigma}$  – загальна кількість реалізацій, які використовуються з урахуванням кількості значущих моментів модуляції ( $i$ );

$T_{CK}$  – часовий інтервал сигнальної конструкції в числі найквітових елементів:

$$T_{CK} = m \cdot t_0, \quad (9)$$

де  $t_0 = 0,9575$ с.

Результати досліджень подані в таблицях 9 та 10.

Таблиця 9

Значення пропускної здатності каналу в залежності від інформаційних параметрів  $s, m$  та  $h = 8$

S	m			H <sub>вт</sub>			C <sub>m</sub>			
	7	8	9							
2	126	462	1287	0,000722	0,00078	0,000825	0,9966512	1,106371	1,147663	
3	462	2002	6188	0,00078	0,000845	0,000895	1,2644242	1,370798	1,399374	
4	1287	6188	20349	0,000825	0,000895	0,000948	1,4755673	1,574295	1,590191	
5	3003	15504	53130	0,000863	0,000936	0,000991	1,6501894	1,739927	1,744028	
6	6188	33649	118755	0,000895	0,000971	0,001027	1,7991946	1,879663	1,872956	
7	11628	65780	237336	0,000923	0,001001	0,001058	1,9291988	2,000545	1,983946	
8	20349	118755	435897	0,000948	0,001027	0,001085	2,0445317	2,107075	2,081394	
9	33649	201376	749398	0,000971	0,00105	0,001109	2,1481865	2,20231	2,168252	
							C <sub>max</sub>	2,4173169	2,38246	2,311689

Таблиця 10

Значення пропускної здатності каналу в залежності від інформаційних параметрів  $s, m$  та  $h = 5$

S	m			H <sub>вт</sub>			C <sub>m</sub>			
	7	8	9							
2	126	462	1287	0,309447	0,351426	0,384424	0,9525476	1,06254	1,105041	
3	462	2002	6188	0,351426	0,398645	0,434953	1,2143319	1,321073	1,351145	
4	1287	6188	20349	0,384424	0,434953	0,473247	1,4207675	1,520038	1,537714	
5	3003	15504	53130	0,411692	0,4645	0,504118	1,5914995	1,681982	1,688125	
6	6188	33649	118755	0,434953	0,489426	0,52999	1,7371863	1,818606	1,814182	
7	11628	65780	237336	0,455246	0,510988	0,552262	1,8642956	1,936797	1,922701	
8	20349	118755	435897	0,473247	0,52999	0,571816	1,9770604	2,040955	2,017979	
9	33649	201376	749398	0,489426	0,546977	0,589245	2,0784072	2,134069	2,102903	
							C <sub>max</sub>	2,4173169	2,38246	2,311689

На рис.2 та рис.3 наведено залежності пропускної здатності каналів з різним рівнем флукутаційних шумів як функцій  $s$  з даних таблиць 9 та 10 (криві 1...3 для  $h = 8$  і  $m = 9,8,7$  відповідно, криві 4...6 для  $h = 5$  і  $m = 9,8,7$  відповідно).

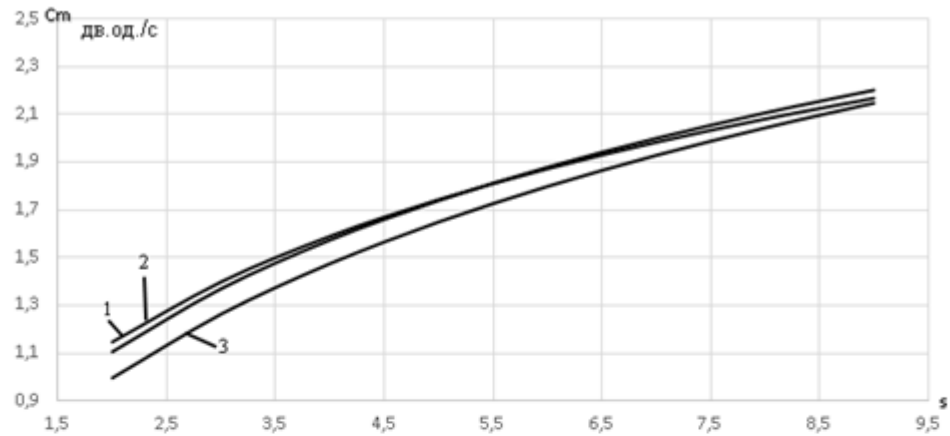


Рис. 2. Залежності пропускної здатності каналу  $C_i = f(s)$  при  $h = 8, m = 9,8,7$

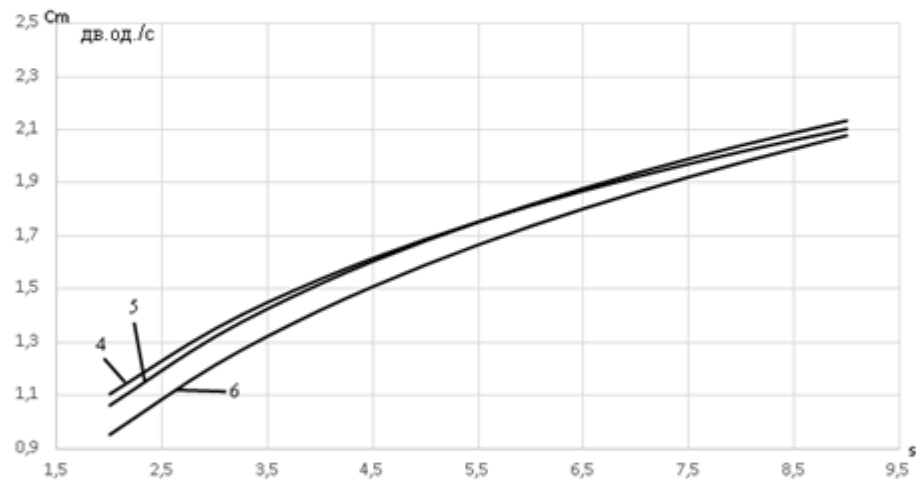


Рис. 3. Залежності пропускної здатності каналу  $C_i = f(s)$  при  $h = 5, m = 9,8,7$

### Висновки

1. З наведеної вище інформації слід зробити висновок, що у двійковому каналі на  $m$ -елементному інтервалі часу, за рахунок значення  $\Delta(s)$  можливо отримати одне й те саме число реалізацій таймерних сигнальних конструкцій на різних інтервалах часу  $T_{СК}$  (рис.1) .

2. При збільшенні  $S$  з 2 до 9 зростає число реалізацій ТСК та пропускна здатність каналу. При  $s = 2$  та збільшенні  $m$  з 7 до 9 пропускна здатність каналу зростає на 15,2%. При  $s = 9$  та збільшенні  $m$  з 7 до 9 пропускна здатність каналу зростає на 0,93% (відношення сигнал/завада  $h = 8$ ).

3. При збільшенні  $S$  з 2 до 9 зростає число реалізацій ТСК та пропускна здатність каналу. При  $s = 2$  та збільшенні  $m$  з 7 до 9 пропускна здатність каналу зростає на 16%. При  $s = 9$  та збільшенні  $m$  з 7 до 9 пропускна здатність каналу зростає на 0,2%(відношення сигнал/завада  $h = 5$ ).

4. Максимальна пропускна здатність каналу зв'язку ( $C_{\max}=2,417$  дв.од./с) досягається за умови, що  $t_0=0.9575$ с,  $m=7$ ,  $N_{p\Sigma}=992687$ .

#### Література

1. Захарченко М.В. Системи передавання даних. – Т. 1: Завадостійке 3-38 кодування : підручник [для студентів вищих технічних навчальних закладів] / М.В. Захарченко. – Одеса : Фенікс, 2009. – 448 с.
2. Захарченко М.В. Системи передавання даних. – Т. 1: Ефективність блокового кодування / [Захарченко М.В., Кільдішев В.Й., Мартинова О.М., Ільїн Д.Ю., Трінтіна Н.А.]. - Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2014.-488 с.
3. Захарченко Н.В. Информационные параметры позиционных и таймерных кодов. Том 1. Информационные параметры позиционных кодов: учеб. пособ. / [Н.В. Захарченко, С.М. Горохов, А.В. Кочетков]. – Одесса: ОНАС им. А.С. Попова, 2018. – 212 с.

#### References

1. Zaharchenko M.V. Systemy peredavannja danyh. – Т. 1: Zavadostijke Z-38 koduvannja : pidruchnyk [dlja studentiv vyshnyh tehnicnyh navchal'nyh zakladiv] / M.V. Zaharchenko. – Odesa : Feniks, 2009. – 448 s.
2. Zaharchenko M.V. Systemy peredavannja danyh. – Т. 1: Efektyvnist' blokovogo koduvannja / [Zaharchenko M.V., Kil'dishev V.J., Martynova O.M., Il'in D.Ju., Trintina N.A.]. - Odesa: ONAZ im. O.S. Popova, 2014.-488 s.
3. Zaharchenko N.V. Informacionnye parametry pozicionnyh i tajmernih kodov. Tom 1. Informacionnye parametry pozicionnyh kodov: ucheb. posob. / [N.V. Zaharchenko, S.M. Gorohov, A.V. Kochetkov]. – Odessa: ONAS im. A.S. Popova, 2018. – 212 s.

Стаття надійшла до редакції

Рецензент – завідувач кафедри автоматизацій, комп'ютерно-інтегрованих технологій і телекомунікацій ХНУ, д.т.н., професор В.В. Мартинюк

## ДОДАТОК Г

**ПРЕЗЕНТАЦІЯ ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ**

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ ТА РАДІОТЕХНІКИ

ДИПЛОМНА РОБОТА

**МОДЕЛЮВАННЯ ТАЙМЕРНИХ СИГНАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЯК ІНСТРУМЕНТАРІЙ ЗБІЛЬШЕННЯ  
ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ В УМОВАХ ДІЇ ЗАВАД  
ПРИ ЗАДАНІЙ ЯКОСТІ ПРИЙОМУ ІНФОРМАЦІЇ**

Студент групи ТРм-19-1

Гончарук Тарас Леонідович

Керівник роботи

кандидат військ. наук, доцент

Лужанський Віктор Ігорович

**АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ:** Перехід від позиційного до непозиційного кодування на основі таймерних сигнальних конструкцій має наступні переваги: підвищується інформаційна ємність найквістового елемента; реалізується завадостійке кодування без додаткових перевірочних елементів; збільшується структурна та інформаційна прихованість передаваних комбінацій. Використання таймерних сигнальних конструкцій дозволяє підвищити пропускну здатність каналу зв'язку, підвищити інформаційну ємність та ентропію кодового слова за постійної тривалості кодових комбінацій, зменшити ймовірність помилкового прийому інформації в умовах дії флуктуаційних завад. Таким чином, науково-технічна задача, яка розв'язується в дипломній роботі, є актуальною.

**МЕТА ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ:** Оцінка ефективності використання таймерних сигнальних конструкцій для збільшення пропускну здатності каналу зв'язку в умовах дії флуктуаційних завад при заданій ймовірності помилкового прийому інформації.

**ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ:**

1. Характеристика блокових кодів та таймерних сигнальних конструкцій.
2. Пропускна здатність каналу при таймерних сигнальних конструкціях.
3. Підвищення інформаційної ємності, ентропії повідомлень та ймовірність помилки в  $M$ -іттих системах фазової модуляції.
4. Ефективність таймерних сигнальних конструкцій при роботі в реальних каналах зв'язку.

**ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ:** процеси перетворення та кодування сигналів, що забезпечують завадозахищеність радіотехнічних та телекомунікаційних систем.

**ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ:** пропускна здатність каналу зв'язку в умовах дії флуктуаційних завад при використанні таймерних сигнальних конструкцій.

**МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ:** методи статистичної теорії зв'язку та теорії інформації, методи спектрального аналізу, методи теорії захисту інформації, теорії сигналів та теорії завадостійкого кодування, а також методи статистичного й імітаційного моделювання.

**НАУКОВА НОВИЗНА ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ:** Проведено моделювання таймерних сигнальних конструкцій з метою визначення пропускної здатності каналу зв'язку в умовах дії завад.

Отримав подальший розвиток удосконалений метод оцінки пропускної здатності каналу зв'язку, інформаційної ємності та ентропії кодового слова.

При моделюванні таймерних сигнальних конструкцій досягнуто підвищення ефективності пропускної здатності каналу зв'язку на 8,22% в умовах дії флуктуаційних завад при вказаній імовірності бітових помилок для забезпечення заданої якості зв'язку.

**ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ:** удосконалений метод оцінки пропускної здатності каналу зв'язку, інформаційної ємності та ентропії кодового слова надає змогу використовувати його в радіотехнічних та телекомунікаційних системах на основі таймерних сигнальних конструкцій для підвищення показників завадостійкості.

## 1 ХАРАКТЕРИСТИКА БЛОКОВИХ КОДІВ ТА ТАЙМЕРНИХ СИГНАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

### 1.1 Ефективність таймерних сигнальних конструкцій при роботі в реальних каналах зв'язку

В таймерних сигнальних конструкціях (ТСК) інформацію закладено у тривалостях декількох окремих часових відрізків сигналу  $t_c$  на інтервалі конструкції  $T_c$  і їхньому взаємному положенні.

Часовий відрізок  $\Delta$  показує частину одиничного елемента  $t_0 > \Delta = \frac{t_0}{s}$  і визначається завадами у каналі та припустимою ймовірністю помилкового приймання сигнальної конструкції ( $s \in 2, 4 \dots 5$ ).

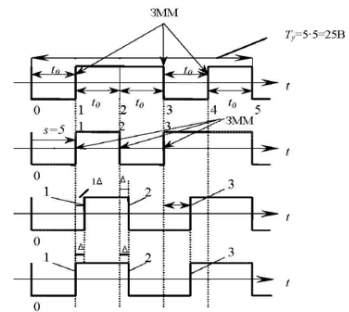


Рисунок 1 – Структура таймерних сигнальних конструкцій при  $i = 3, s = 5$

## 2 ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ КАНАЛУ ПРИ ТАЙМЕРНИХ СИГНАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЯХ

### 2.1 Обчислення числа реалізацій в таймерних сигнальних конструкціях

Потужність реалізованого ансамблю  $N_{PR}$  на інтервалі  $T_{CK} = m \cdot t_0$  визначається наступним виразом:

$$N_{PR} = \frac{(ms - i(s-1))!}{i!(ms - is)!} \quad (1)$$

де  $i$  – число заданих відрізків сигналу на інтервалі кодового слова довжиною  $m$  найквістових елементів;

$\Delta$  – частина елемента  $t_0$  ( $\Delta = t_0/s$ ),  $s \in (2, 3; \dots, s_0)$  – цілі числа, яка забезпечує розпізнавальну здатність тривалостей окремих відрізків із заданою ймовірністю помилки на виході каналу зв'язку.

Таблиця 1 - Число реалізацій ТСК при  $m \in 2+15$  для  $i=1$   $s \in 2+20$

$i$	$s$	$m$														
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384	32768	
	3	5	7	10	13	16	19	22	25	28	31	34	37	40	43	
	4	6	9	13	17	21	25	29	33	37	41	45	49	53	57	
	5	7	11	16	21	26	31	36	41	46	51	56	61	66	71	
	6	8	13	19	25	31	37	43	49	55	61	67	73	79	85	
	7	9	15	22	29	36	43	50	57	64	71	78	85	92	99	
	8	10	17	25	33	41	49	57	65	73	81	89	97	105	113	
	9	11	19	28	37	46	55	64	73	82	91	100	109	118	127	
	10	12	21	31	41	51	61	71	81	91	101	111	121	131	141	
	11	13	23	34	45	56	67	78	89	100	111	122	133	144	155	
	12	14	25	37	49	61	73	85	97	109	121	133	145	157	169	
	13	15	27	40	53	66	79	92	105	118	131	144	157	170	183	
	14	16	29	43	57	71	85	99	113	127	141	155	169	183	197	
	15	17	31	46	61	76	91	106	121	136	151	166	181	196	211	
	16	18	33	49	65	81	97	113	129	145	161	177	193	209	225	
	17	19	35	52	69	86	103	120	137	154	171	188	205	222	239	
	18	20	37	55	73	91	109	127	145	163	181	199	217	235	253	
	19	21	39	58	77	96	115	134	153	172	191	210	229	248	267	
	20	22	41	61	81	101	121	141	161	181	201	221	241	261	281	

Таблиця 2 - Число реалізацій ТСК при  $m \in 2 \div 15$  для  $i=2$   $s \in 2 \div 20$

$i$	$s$	$m$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2	2	$N_{br}$	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384	32768
	3	$N_{br}$	1	6	15	28	45	66	91	120	153	190	231	276	325	378
	4	$N_{br}$	1	15	45	91	153	231	325	435	561	703	861	1035	1225	1431
	5	$N_{br}$	1	21	66	136	231	351	496	666	861	1081	1326	1596	1891	2211
	6	$N_{br}$	1	28	91	190	325	496	703	946	1225	1540	1891	2278	2701	3160
	7	$N_{br}$	1	36	120	253	435	666	946	1275	1653	2080	2556	3091	3655	4278
	8	$N_{br}$	1	45	153	325	561	861	1225	1653	2145	2701	3321	4005	4753	5565
	9	$N_{br}$	1	55	190	406	703	1081	1540	2080	2701	3403	4186	5050	5995	7021
	10	$N_{br}$	1	66	231	496	861	1326	1891	2556	3321	4186	5151	6216	7381	8646
	11	$N_{br}$	1	78	276	595	1035	1596	2278	3081	4005	5050	6216	7503	8911	10440
	12	$N_{br}$	1	91	325	703	1225	1891	2701	3655	4753	5995	7381	8911	10585	12403
	13	$N_{br}$	1	105	378	820	1431	2211	3180	4278	5565	7021	8646	10440	12403	14533
	14	$N_{br}$	1	120	435	946	1653	2556	3655	4950	6441	8128	10011	12090	14365	16888
	15	$N_{br}$	1	136	496	1081	1891	2926	4186	5611	7381	9316	11436	13861	16700	19931
	16	$N_{br}$	1	153	561	1225	2145	3321	4753	6441	8385	10585	13041	15732	18865	21991
	17	$N_{br}$	1	171	630	1378	2415	3741	5356	7260	9453	11935	14669	17832	21212	24801
	18	$N_{br}$	1	190	703	1540	2701	4186	5995	8128	10555	13366	16700	19886	23700	27836
	19	$N_{br}$	1	210	780	1711	3003	4656	6701	9045	11781	14800	18336	22123	26394	30861
	20	$N_{br}$	1	231	861	1891	3321	5151	7381	10011	13041	16471	20304	24561	29187	34203

Таблиця 3 - Число реалізацій ТСК при  $m \in 2 \div 15$  для  $i=5$   $s \in 2 \div 20$

$i$	$s$	$m$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
5	2	$N_{br}$	0	0	0	1	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384	32768
	3	$N_{br}$	0	0	0	1	21	126	462	1287	3003	6188	11628	20349	33649	53130
	4	$N_{br}$	0	0	0	1	36	462	2002	6188	15504	33649	65790	118755	201376	324632
	5	$N_{br}$	0	0	0	1	126	1287	6188	20349	53130	118755	237336	435897	749398	1221759
	6	$N_{br}$	0	0	0	1	252	3003	15504	53130	142506	324632	658008	1221759	2118760	3478761
	7	$N_{br}$	0	0	0	1	462	6188	33649	118755	324632	749398	1533939	2869685	5006386	8259888
	8	$N_{br}$	0	0	0	1	792	11628	65780	237336	658008	1533939	3162310	5949147	10424128	17259380
	9	$N_{br}$	0	0	0	1	1287	20349	118755	435897	1221759	2869685	5949147	11238313	19757815	32801517
	10	$N_{br}$	0	0	0	1	2002	33649	201376	749398	2118760	5006386	10424128	19757815	34826302	57940519
	11	$N_{br}$	0	0	0	1	3003	53130	324632	1221759	3478761	8259888	17259380	32801517	57940519	96560646
	12	$N_{br}$	0	0	0	1	4368	80730	501942	1906884	5461512	13019609	27283336	51971283	91962520	1.53 · 10 <sup>8</sup>
	13	$N_{br}$	0	0	0	1	6188	118755	749398	2869685	8259888	19757815	41507642	79208745	1.4 · 10 <sup>8</sup>	2.35 · 10 <sup>8</sup>
	14	$N_{br}$	0	0	0	1	8568	169911	1086008	4187106	12103014	29034396	61124064	1.17 · 10 <sup>8</sup>	2.07 · 10 <sup>8</sup>	3.47 · 10 <sup>8</sup>
	15	$N_{br}$	0	0	0	1	11628	237336	1533939	5949147	17259380	41507642	87541243	1.68 · 10 <sup>8</sup>	2.95 · 10 <sup>8</sup>	4.98 · 10 <sup>8</sup>
	16	$N_{br}$	0	0	0	1	15504	324632	2118760	8259888	24040016	57940519	1.22 · 10 <sup>8</sup>	2.25 · 10 <sup>8</sup>	4.17 · 10 <sup>8</sup>	6.99 · 10 <sup>8</sup>
	17	$N_{br}$	0	0	0	1	20349	435897	2869685	11238313	32801517	79208745	1.68 · 10 <sup>8</sup>	3.21 · 10 <sup>8</sup>	5.72 · 10 <sup>8</sup>	9.59 · 10 <sup>8</sup>
	18	$N_{br}$	0	0	0	1	26334	575757	3819816	15020334	43949268	1.06 · 10 <sup>8</sup>	2.25 · 10 <sup>8</sup>	4.32 · 10 <sup>8</sup>	7.7 · 10 <sup>8</sup>	1.28 · 10 <sup>9</sup>
	19	$N_{br}$	0	0	0	1	33649	749398	5006386	19757815	57940519	1.4 · 10 <sup>8</sup>	2.98 · 10 <sup>8</sup>	5.72 · 10 <sup>8</sup>	1.02 · 10 <sup>9</sup>	1.7 · 10 <sup>9</sup>
	20	$N_{br}$	0	0	0	1	42504	962598	6471002	25621596	72297500	1.83 · 10 <sup>8</sup>	3.88 · 10 <sup>8</sup>	7.45 · 10 <sup>8</sup>	1.33 · 10 <sup>9</sup>	2.23 · 10 <sup>9</sup>

На основі таблиці 2 подано залежності тривалості сигнальних конструкцій за заданої потужності колових множин і параметра  $s$ .

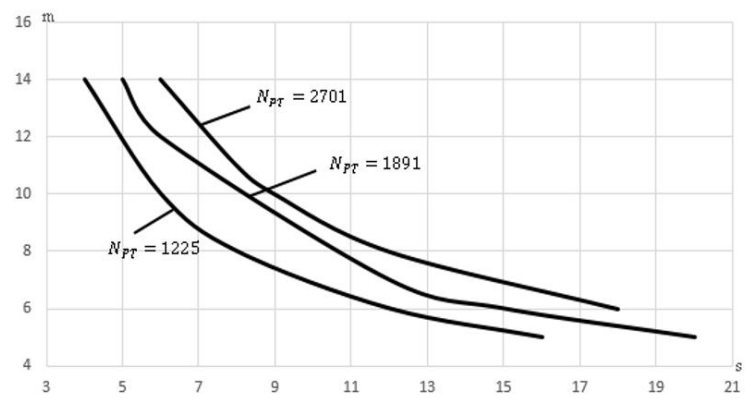


Рисунок 2 - Залежності  $m = f(s)$  при  $N = \text{const}$

## 2.2 Обчислення пропускної здатності каналу при таймерних сигнальних конструкціях

На основі даних взятих з таблиці 2.5, було проведено дослідження залежності пропускної здатності каналів з різним рівнем флуктуаційних шумів за наступними формулами:

- значення пропускної здатності каналу зв'язку:

$$C_n = \frac{1}{m} \cdot (\log_2 N_{PT} - H_{BT}), \quad (2)$$

де -  $H_{BT}$  визначає втрати в каналі через невизначеність у прийманні кодової сигнальної конструкції:

$$H_{BT} = - \left[ P_B \cdot \log_2 P_B + (1 - P_B) \cdot \log_2 \frac{1 - P_B}{N_{PT} - 1} \right], \quad (3)$$

де -  $P_B$  ймовірність вірного приймання сигнальної конструкції з  $i$ -переходами:

$$P_B = \left[ 2\Phi \left( \frac{\Delta_{\text{опт}}}{2 \cdot \sigma_K} \right) \right]^i, \quad (4)$$

де -  $\Delta_{\text{опт}} = (3,8 \dots 5,5)$

Середнє число моментів модуляції дорівнює:

$$\begin{aligned} i &= \sum_{i=1}^m P[N_F(i)]i \\ P[N_F(i)] &= \frac{N_F}{N_F \Sigma} \end{aligned} \quad (5)$$

Середньоквадратичне відхилення зміщення фронту сигналу на виході каналу:

$$\sigma_K = \frac{4}{h}, \quad (6)$$

де -  $h$  - відношення сигнал/завада,  $h = U_c / U_z$ .

Граничне значення пропускної здатності каналу зв'язку буде визначатися виразом:

$$C_{\max} = \frac{\log_2 N_{\Sigma}}{T_{\text{СК}}}, \quad (7)$$

де  $N_{\Sigma}$  – загальна кількість реалізацій, які використовуються з урахуванням кількості значущих моментів модуляції ( $i$ );

$T_{\text{СК}}$  – часовий інтервал сигнальної конструкції в числі найквістових елементів:

$$T_{\text{СК}} = m \cdot t_0, \quad (8)$$

де  $t_0 = 0,9575\text{с}$ .

Результати досліджень подані в таблицях 4, 5, 6, 7, 8.

Таблиця 4 – Значення пропускної здатності каналу в залежності від інформаційних параметрів  $s$ ,  $m$  та  $h = 8$

$S$	$m$			Нвт			$C_n$			
	7	8	9							
2	126	462	1287	0,000722	0,00078	0,000825	0,9966512	1,106371	1,147663	
3	462	2002	6188	0,00078	0,000845	0,000895	1,2644242	1,370798	1,399374	
4	1287	6188	20349	0,000825	0,000895	0,000948	1,4755673	1,574295	1,590191	
5	3003	15504	53130	0,000863	0,000936	0,000991	1,6501894	1,739927	1,744028	
6	6188	33649	118755	0,000895	0,000971	0,001027	1,7991946	1,879663	1,872956	
7	11628	65780	237336	0,000923	0,001001	0,001058	1,9291988	2,000545	1,983946	
8	20349	118755	435897	0,000948	0,001027	0,001085	2,0445317	2,107075	2,081394	
9	33649	201376	749398	0,000971	0,00105	0,001109	2,1481865	2,20231	2,168252	
							<b><math>C_{\max}</math></b>	2,4173169	2,38246	2,311689

Таблиця 5 – Значення пропускної здатності каналу в залежності від інформаційних параметрів s, m та h = 5

S	m			Нвт			C <sub>а</sub>			
	7	8	9							
2	126	462	1287	0,309447	0,351426	0,384424	0,9525476	1,06254	1,105041	
3	462	2002	6188	0,351426	0,398645	0,434953	1,2143319	1,321073	1,351145	
4	1287	6188	20349	0,384424	0,434953	0,473247	1,4207675	1,520038	1,537714	
5	3003	15504	53130	0,411692	0,4645	0,504118	1,5914995	1,681982	1,688125	
6	6188	33649	118755	0,434953	0,489426	0,52999	1,7371863	1,818606	1,814182	
7	11628	65780	237336	0,455246	0,510988	0,552262	1,8642956	1,936797	1,922701	
8	20349	118755	435897	0,473247	0,52999	0,571816	1,9770604	2,040955	2,017979	
9	33649	201376	749398	0,489426	0,546977	0,589245	2,0784072	2,134069	2,102903	
							<b>C<sub>max</sub></b>	2,4173169	2,38246	2,311689

Таблиця 6 – Значення пропускної здатності каналу в залежності від інформаційних параметрів s, m та h = 10

S	m			Нвт			C <sub>а</sub>			
	7	8	9							
2	126	462	1287	2,78 · 10 <sup>-6</sup>	2,94 · 10 <sup>-6</sup>	3,07 · 10 <sup>-6</sup>	0,9967539	1,106468	1,147755	
3	462	2002	6188	2,94 · 10 <sup>-6</sup>	3,13 · 10 <sup>-6</sup>	3,27 · 10 <sup>-6</sup>	1,2645352	1,370903	1,399473	
4	1287	6188	20349	3,07 · 10 <sup>-6</sup>	3,27 · 10 <sup>-6</sup>	3,42 · 10 <sup>-6</sup>	1,4756848	1,574407	1,590296	
5	3003	15504	53130	3,18 · 10 <sup>-6</sup>	3,38 · 10 <sup>-6</sup>	3,54 · 10 <sup>-6</sup>	1,6503122	1,740044	1,744137	
6	6188	33649	118755	3,27 · 10 <sup>-6</sup>	3,48 · 10 <sup>-6</sup>	3,64 · 10 <sup>-6</sup>	1,799322	1,879784	1,873069	
7	11628	65780	237336	3,35 · 10 <sup>-6</sup>	3,57 · 10 <sup>-6</sup>	3,73 · 10 <sup>-6</sup>	1,9293303	2,00067	1,984063	
8	20349	118755	435897	3,42 · 10 <sup>-6</sup>	3,64 · 10 <sup>-6</sup>	3,8 · 10 <sup>-6</sup>	2,0446667	2,107203	2,081514	
9	33649	201376	749398	3,48 · 10 <sup>-6</sup>	3,71 · 10 <sup>-6</sup>	3,87 · 10 <sup>-6</sup>	2,1483246	2,202441	2,168374	
							<b>C<sub>max</sub></b>	2,4173169	2,38246	2,311689

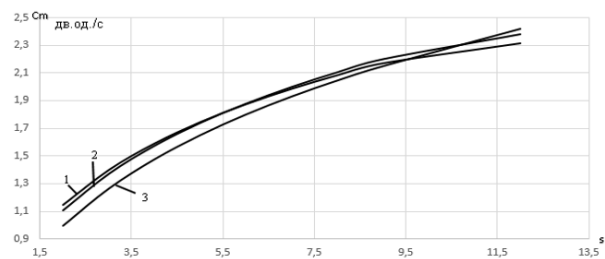
Таблиця 7 – Значення пропускної здатності каналу в залежності від інформаційних параметрів s, m та h = 12

S	m			Нвт			C <sub>а</sub>			
	7	8	9							
2	126	462	1287	2,99 · 10 <sup>-7</sup>	3,15 · 10 <sup>-7</sup>	3,27 · 10 <sup>-7</sup>	0,9967542	1,106469	1,147755	
3	462	2002	6188	3,15 · 10 <sup>-7</sup>	3,33 · 10 <sup>-7</sup>	3,46 · 10 <sup>-7</sup>	1,2645355	1,370903	1,399473	
4	1287	6188	20349	3,27 · 10 <sup>-7</sup>	3,46 · 10 <sup>-7</sup>	3,61 · 10 <sup>-7</sup>	1,4756851	1,574407	1,590297	
5	3003	15504	53130	3,38 · 10 <sup>-7</sup>	3,58 · 10 <sup>-7</sup>	3,73 · 10 <sup>-7</sup>	1,6503126	1,740044	1,744138	
6	6188	33649	118755	3,46 · 10 <sup>-7</sup>	3,67 · 10 <sup>-7</sup>	3,83 · 10 <sup>-7</sup>	1,7993224	1,879784	1,87307	
7	11628	65780	237336	3,54 · 10 <sup>-7</sup>	3,75 · 10 <sup>-7</sup>	3,91 · 10 <sup>-7</sup>	1,9293307	2,00067	1,984063	
8	20349	118755	435897	3,61 · 10 <sup>-7</sup>	3,83 · 10 <sup>-7</sup>	3,99 · 10 <sup>-7</sup>	2,0446671	2,107204	2,081514	
9	33649	201376	749398	3,67 · 10 <sup>-7</sup>	3,89 · 10 <sup>-7</sup>	4,05 · 10 <sup>-7</sup>	2,1483251	2,202441	2,168375	
							<b>C<sub>max</sub></b>	2,4173169	2,38246	2,311689

Таблиця 8 – Значення пропускної здатності каналу в залежності від інформаційних параметрів  $s$ ,  $m$  та  $h = 14$ 

$s$	$m$			Нгг			$C_{in}$			
	7	8	9							
2	126	462	1287	$2,99 \cdot 10^{-7}$	$3,15 \cdot 10^{-7}$	$3,27 \cdot 10^{-7}$	0,99967542	1,106469	1,147755	
3	462	2002	6188	$3,15 \cdot 10^{-7}$	$3,33 \cdot 10^{-7}$	$3,46 \cdot 10^{-7}$	1,2645355	1,370903	1,399473	
4	1287	6188	20349	$3,27 \cdot 10^{-7}$	$3,46 \cdot 10^{-7}$	$3,61 \cdot 10^{-7}$	1,4756851	1,574407	1,5590297	
5	3003	15504	53130	$3,38 \cdot 10^{-7}$	$3,58 \cdot 10^{-7}$	$3,73 \cdot 10^{-7}$	1,6503126	1,740044	1,744138	
6	6188	33649	118755	$3,46 \cdot 10^{-7}$	$3,67 \cdot 10^{-7}$	$3,83 \cdot 10^{-7}$	1,7993224	1,879784	1,87307	
7	11628	65780	237336	$3,54 \cdot 10^{-7}$	$3,75 \cdot 10^{-7}$	$3,91 \cdot 10^{-7}$	1,9293307	2,00067	1,984063	
8	20349	118755	435897	$3,61 \cdot 10^{-7}$	$3,83 \cdot 10^{-7}$	$3,99 \cdot 10^{-7}$	2,0446671	2,107204	2,081514	
9	33649	201376	749398	$3,67 \cdot 10^{-7}$	$3,89 \cdot 10^{-7}$	$4,05 \cdot 10^{-7}$	2,1483251	2,200441	2,168373	
							$C_{max}$	2,4173169	2,38246	2,311689

На рис. 3, рис. 4, рис. 5, рис. 6 та рис. 7 наведено залежності пропускної здатності каналів з різним рівнем флуктуаційних шумів як функцій  $s$  з даних таблиць 4, 5, 6, 7 та 8 (криві 1...3 для  $h = 8$  і  $m = 9,8,7$  відповідно, криві 4...6 для  $h = 5$  і  $m = 9,8,7$  відповідно, криві 7...9 для  $h = 10$  і  $m = 9,8,7$  відповідно, криві 10...12 для  $h = 12$  і  $m = 9,8,7$  відповідно, криві 13...15 для  $h = 14$  і  $m = 9,8,7$  відповідно).

Рисунк 3 – Залежність пропускної здатності каналу  $C_{in} = f(s)$  при  $h = 8$ ,  $m = 9,8,7$

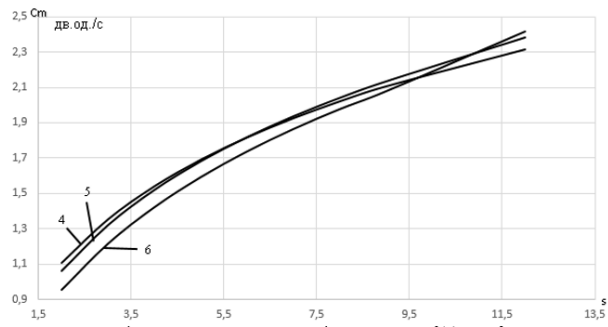


Рисунок 4 – Залежність пропускної здатності каналу  $C_i = f(s)$  при  $h = 5, m = 9,8,7$

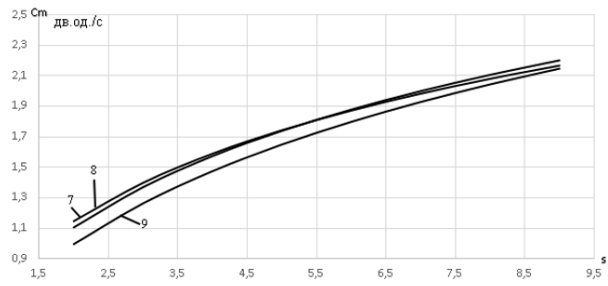


Рисунок 5 – Залежність пропускної здатності каналу  $C_i = f(s)$  при  $h = 10, m = 9,8,7$

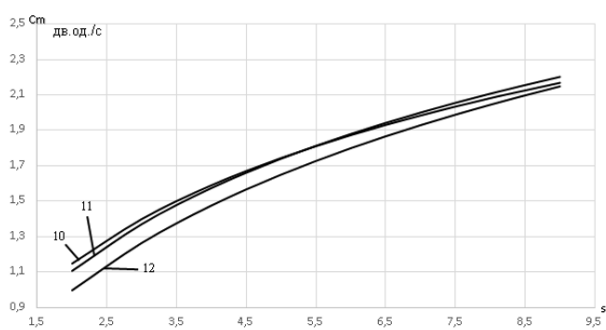


Рисунок 6 - Залежність пропускної здатності каналу  $C_i = f(s)$  при  $h = 12$ ,  $m = 9,8,7$

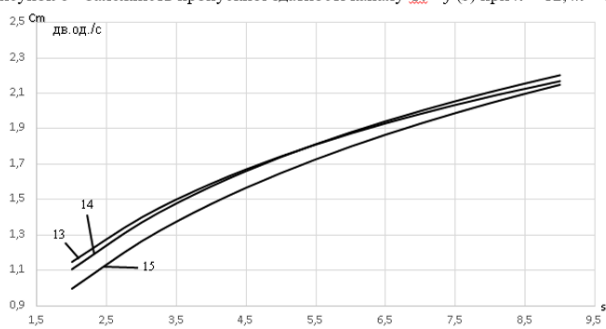


Рисунок 7 - Залежність пропускної здатності каналу  $C_i = f(s)$  при  $h = 14$ ,  $m = 9,8,7$

### 3 ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ЄМНОСТІ, ЕНТРОПІЇ ПОВІДОМЛЕНЬ ТА ЙМОВІРНІСТЬ ПОМИЛКИ В M-ІТТИХ СИСТЕМАХ ФАЗОВОЇ МОДУЛЯЦІЇ

#### 3.1 Імовірність помилки в M-іттих системах фазової модуляції

Відомо, що імовірність помилки залежить від відношення  $E_b / N_0$ . Тут  $E_b$  – енергія, що витрачається для передачі одного біта інформаційного потоку, а  $N_0$  – спектральна щільність потужності шуму. Обидві величини вимірюються на вході демодулятора приймача. З урахуванням їх розмірностей:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{\text{джоуль}}{\text{ватт/герц}} = \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{Вт} \cdot \text{с}} . \quad (9)$$

В системі з двійковою фазовою маніпуляцією імовірність бітової помилки визначається по формулі :

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) . \quad (10)$$

Функція  $Q(x)$ , яка називається гауссовим інтегралом помилок, визначається наступним чином:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du . \quad (11)$$

Потужність сигналу на вході приймача визначається за формулою:

$$P_c = 10^{0,1 P_r} . \quad (12)$$

Тривалість тактового інтервалу, тобто тривалість одного біту, рівна:

$$T = 1 / R , \quad (13)$$

де  $R$  – швидкість передачі інформації.

Енергія, яка використовується для передачі одного біту, визначається наступним чином:

$$E_b = P_c \cdot T . \quad (14)$$

Одностороння спектральна щільність потужності білого шуму може бути представлена як:

$$N_0 = nkT_0 , \quad (15)$$

де  $n = 7,94$  – коефіцієнт шуму приймача;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Вт}$  - стала Больцмана;  $T_0$  - шумова температура в градусах Кельвіна.

Таблиця 9 – Ймовірність бітової помилки в залежності від швидкості передачі інформації, шумової температури та відношенні сигнал/шум при потужності сигналу на вході приймача  $P_c = -105$  дБВт

R, Мбіт/с	T <sub>0</sub> , К	E <sub>b</sub> /N <sub>0</sub>	E <sub>b</sub> /N <sub>0</sub> , дБ	P <sub>b</sub>
100	284	10.16	10.07	0,3241·10 <sup>-3</sup>
	294	9.82	9.920	4,71·10 <sup>-6</sup>
	304	9.49	9.774	6,50·10 <sup>-6</sup>
120	284	8.47	9.278	1,89·10 <sup>-3</sup>
	294	8.18	9.128	2,62·10 <sup>-3</sup>
	304	7.91	8.982	3,48·10 <sup>-3</sup>
140	284	7.26	8.609	6,94·10 <sup>-3</sup>
	294	7.01	8.458	9,03·10 <sup>-3</sup>
	304	6.78	8.313	1,15·10 <sup>-4</sup>
160	284	6.35	8.029	1,83·10 <sup>-4</sup>
	294	6.14	7.878	2,30·10 <sup>-4</sup>
	304	5.93	7.733	2,86·10 <sup>-4</sup>
180	284	5.65	7.517	3,89·10 <sup>-4</sup>
	294	5.45	7.367	4,79·10 <sup>-4</sup>
	304	5.27	7.222	5,81·10 <sup>-4</sup>
200	284	5.08	7.060	7,17·10 <sup>-4</sup>
	294	4.91	6.909	8,65·10 <sup>-4</sup>
	304	4.75	6.764	1,03·10 <sup>-3</sup>
220	284	4.62	6.646	1,19·10 <sup>-3</sup>
	294	4.46	6.495	1,41·10 <sup>-3</sup>
	304	4.32	6.350	1,65·10 <sup>-3</sup>
240	284	4.23	6.268	1,81·10 <sup>-3</sup>
	294	4.09	6.117	2,12·10 <sup>-3</sup>
	304	3.96	5.972	2,46·10 <sup>-3</sup>
260	284	3.91	5.920	2,59·10 <sup>-3</sup>
	294	3.78	5.770	3,00·10 <sup>-3</sup>
	304	3.65	5.625	3,44·10 <sup>-3</sup>

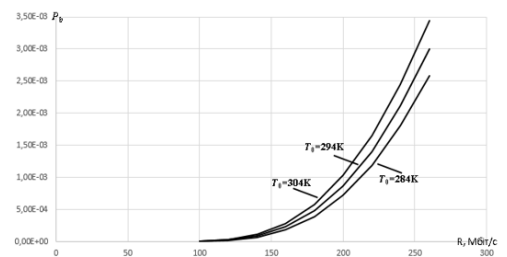


Рисунок 8 – Ймовірність бітової помилки в залежності від швидкості передачі інформації, шумової температури при потужності сигналу на вході приймача  $P_c = -105$  дБВт

Таблиця 10 – Ймовірність бітової помилки в залежності від потужності сигналу на вході приймача, швидкості передачі інформації та відношенні сигнал/шум при шумовій температурі  $T=285K$

$P_c$ , дБВт	$R$ , Мбіт/с	$E_b/N_0$	$E_b/N_0$ , дБ	$P_b$
-100	100	32.02	15.055	$6,11 \cdot 10^{-16}$
	160	20.01	13.013	$1,25 \cdot 10^{-10}$
	220	14.56	11.630	$3,42 \cdot 10^{-8}$
-105	100	10.13	10.055	$3,39 \cdot 10^{-6}$
	160	6.33	8.013	$1,87 \cdot 10^{-4}$
	220	4.60	6.630	$1,21 \cdot 10^{-3}$
-110	100	3.20	5.055	$5,69 \cdot 10^{-3}$
	160	2.00	3.013	$2,27 \cdot 10^{-2}$
	220	1.46	1.630	$4,40 \cdot 10^{-2}$
-115	100	1.01	0.055	$7,74 \cdot 10^{-2}$
	160	0.63	-1.987	$1,30 \cdot 10^{-1}$
	220	0.46	-3.370	$1,69 \cdot 10^{-1}$
-120	100	0.32	-4.945	$2,12 \cdot 10^{-1}$
	160	0.20	-6.987	$2,63 \cdot 10^{-1}$
	220	0.15	-8.370	$2,95 \cdot 10^{-1}$

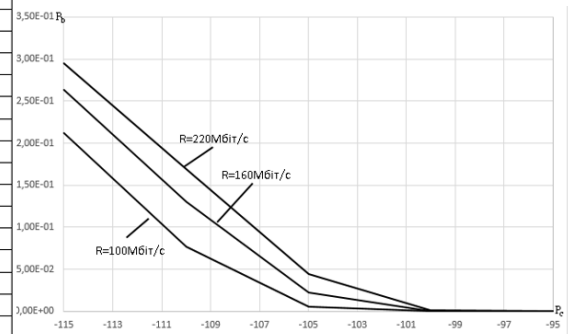
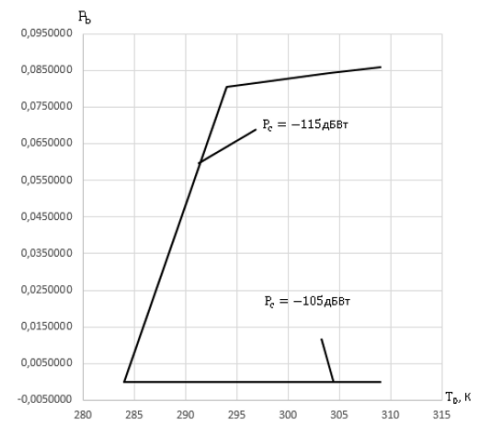


Рисунок 9 – Ймовірність бітової помилки в залежності від потужності сигналу на вході приймача, швидкості передачі інформації та відношенні сигнал/шум при шумовій температурі  $T=285K$

Таблиця 11 – Ймовірність бітової помилки в залежності від шумової температури, потужності сигналу на вході приймача та відношенні сигнал/шум при швидкості передачі інформації  $R=100$  Мбіт/с

$T_0, K$	$P_c, дБВт$	$E_b/N_0$	$E_0/N_0, дБ$	$P_b$
284	-105	10,16	10,070	$4,71 \cdot 10^{-6}$
	-115	1,02	0,070	$6,50 \cdot 10^{-6}$
294	-105	9,82	9,920	$4,69 \cdot 10^{-6}$
	-115	0,98	-0,080	$8,06 \cdot 10^{-2}$
304	-105	9,49	9,774	$6,58 \cdot 10^{-6}$
	-115	0,95	-0,226	$8,41 \cdot 10^{-2}$
309	-105	9,34	9,703	$7,73 \cdot 10^{-6}$
	-115	0,93	-0,297	$8,59 \cdot 10^{-2}$



Рисунки 10 – Ймовірність бітової помилки в залежності від шумової температури, потужності сигналу на вході приймача та відношенні сигнал/шум при швидкості передачі інформації  $R=100$  Мбіт/с

3.2 Збільшення інформаційної ємності та ентропії кодового слова за постійної тривалості.

Інформаційна ємність найквістового елемента визначається:

$$I_H = \frac{\log_2 N_{PT}}{m} \quad (16)$$

Таблиця 12 - Значення інформаційної ємності найквістового елемента при  $m \in (4 \div 15), S \in 2 \div 20, i = 2$ .

<i>i</i>	<i>S</i>	<i>m</i>	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2	$I_H$	0,977	0,961	0,915	0,863	0,813	0,767	0,726	0,688	0,654	0,624	0,596	0,571	
3	$I_H$	1,202	1,156	1,085	1,012	0,946	0,887	0,834	0,788	0,746	0,709	0,676	0,645	
4	$I_H$	1,373	1,302	1,210	1,122	1,043	0,974	0,913	0,860	0,812	0,770	0,733	0,699	
5	$I_H$	1,511	1,417	1,309	1,208	1,119	1,042	0,975	0,916	0,864	0,818	0,777	0,741	
6	$I_H$	1,627	1,514	1,391	1,279	1,182	1,098	1,026	0,963	0,907	0,858	0,814	0,775	
7	$I_H$	1,727	1,597	1,461	1,340	1,236	1,146	1,069	1,002	0,943	0,891	0,845	0,804	
8	$I_H$	1,814	1,669	1,522	1,393	1,282	1,188	1,107	1,036	0,975	0,921	0,872	0,829	
9	$I_H$	1,892	1,733	1,576	1,440	1,324	1,225	1,140	1,067	1,003	0,946	0,896	0,852	
10	$I_H$	1,963	1,791	1,625	1,482	1,361	1,258	1,170	1,094	1,028	0,969	0,918	0,872	
11	$I_H$	2,027	1,843	1,669	1,520	1,394	1,288	1,197	1,118	1,050	0,990	0,937	0,890	
12	$I_H$	2,086	1,891	1,710	1,555	1,425	1,315	1,221	1,141	1,071	1,009	0,955	0,907	
13	$I_H$	2,141	1,936	1,747	1,587	1,453	1,340	1,244	1,162	1,090	1,027	0,971	0,922	
14	$I_H$	2,191	1,977	1,782	1,617	1,479	1,364	1,265	1,181	1,107	1,043	0,986	0,936	
15	$I_H$	2,239	2,016	1,814	1,645	1,504	1,385	1,285	1,199	1,124	1,058	1,002	0,949	
16	$I_H$	2,283	2,052	1,844	1,671	1,527	1,406	1,303	1,215	1,139	1,072	1,015	0,962	
17	$I_H$	2,325	2,086	1,873	1,696	1,548	1,425	1,321	1,231	1,153	1,086	1,027	0,973	
18	$I_H$	2,364	2,118	1,900	1,719	1,569	1,443	1,337	1,246	1,169	1,098	1,038	0,984	
19	$I_H$	2,402	2,148	1,925	1,741	1,588	1,460	1,352	1,259	1,180	1,110	1,049	0,994	
20	$I_H$	2,437	2,177	1,950	1,762	1,606	1,477	1,367	1,273	1,192	1,122	1,060	1,004	

Таблиця 13 – Значення інформаційної ємності найквістового елемента при  $m \in (4 \div 15), S \in 2 \div 20, i = 4$ .

<i>i</i>	<i>S</i>	<i>m</i>	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2	$I_H$	0	0,781	1,022	1,102	1,119	1,107	1,083	1,053	1,020	0,987	0,955	0,925	
3	$I_H$	0	1,026	1,286	1,355	1,354	1,324	1,284	1,239	1,193	1,149	1,107	1,067	
4	$I_H$	0	1,226	1,492	1,547	1,530	1,486	1,432	1,376	1,321	1,268	1,218	1,171	
5	$I_H$	0	1,395	1,661	1,703	1,672	1,615	1,550	1,484	1,421	1,361	1,305	1,253	
6	$I_H$	0	1,543	1,805	1,834	1,790	1,722	1,648	1,574	1,504	1,438	1,377	1,320	
7	$I_H$	0	1,673	1,930	1,947	1,892	1,814	1,732	1,651	1,575	1,504	1,438	1,378	
8	$I_H$	0	1,790	2,040	2,046	1,981	1,895	1,805	1,718	1,636	1,561	1,491	1,428	
9	$I_H$	0	1,896	2,139	2,134	2,060	1,966	1,869	1,777	1,691	1,611	1,539	1,472	
10	$I_H$	0	1,993	2,229	2,214	2,131	2,030	1,928	1,830	1,740	1,657	1,581	1,511	
11	$I_H$	0	2,083	2,311	2,287	2,196	2,088	1,981	1,879	1,784	1,698	1,619	1,547	
12	$I_H$	0	2,166	2,387	2,354	2,256	2,142	2,029	1,923	1,825	1,736	1,654	1,580	
13	$I_H$	0	2,243	2,457	2,416	2,311	2,191	2,074	1,964	1,863	1,771	1,687	1,610	
14	$I_H$	0	2,316	2,522	2,474	2,362	2,237	2,115	2,002	1,898	1,803	1,717	1,638	
15	$I_H$	0	2,384	2,584	2,528	2,410	2,280	2,154	2,037	1,930	1,833	1,745	1,664	
16	$I_H$	0	2,448	2,641	2,578	2,454	2,320	2,190	2,070	1,961	1,861	1,771	1,689	
17	$I_H$	0	2,509	2,695	2,626	2,497	2,358	2,224	2,101	1,989	1,888	1,795	1,712	
18	$I_H$	0	2,567	2,747	2,671	2,536	2,393	2,257	2,131	2,016	1,913	1,819	1,734	
19	$I_H$	0	2,622	2,795	2,713	2,574	2,427	2,287	2,158	2,042	1,936	1,841	1,754	
20	$I_H$	0	2,675	2,842	2,754	2,610	2,459	2,316	2,185	2,066	1,959	1,861	1,774	

Таблиця 14 – Значення інформаційної ємності найквістового елемента при  $m \in (4 \div 15), S \in 2 \div 20, i = 6$ .

$i$	$S$	$m$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	2	$I_H$	0	0	0	0,687	0,964	1,095	1,155	1,179	1,182	1,172	1,156	1,136
	3	$I_H$	0	0	0	0,913	1,231	1,365	1,418	1,430	1,420	1,398	1,370	1,339
	4	$I_H$	0	0	0	1,102	1,444	1,576	1,619	1,619	1,598	1,566	1,528	1,488
	5	$I_H$	0	0	0	1,265	1,621	1,748	1,781	1,772	1,741	1,700	1,654	1,607
	6	$I_H$	0	0	0	1,407	1,773	1,893	1,918	1,899	1,860	1,811	1,759	1,705
	7	$I_H$	0	0	0	1,535	1,905	2,019	2,036	2,009	1,962	1,907	1,848	1,789
	8	$I_H$	0	0	0	1,650	2,023	2,131	2,140	2,105	2,052	1,990	1,926	1,862
	9	$I_H$	0	0	0	1,756	2,130	2,231	2,232	2,191	2,131	2,064	1,996	1,927
	10	$I_H$	0	0	0	1,852	2,227	2,321	2,316	2,268	2,203	2,131	2,058	1,986
6	11	$I_H$	0	0	0	1,942	2,315	2,404	2,392	2,339	2,268	2,192	2,114	2,039
	12	$I_H$	0	0	0	2,026	2,397	2,480	2,462	2,403	2,328	2,247	2,166	2,088
	13	$I_H$	0	0	0	2,104	2,474	2,551	2,527	2,463	2,383	2,298	2,214	2,132
	14	$I_H$	0	0	0	2,177	2,545	2,617	2,587	2,519	2,435	2,346	2,259	2,174
	15	$I_H$	0	0	0	2,247	2,612	2,678	2,644	2,571	2,482	2,390	2,300	2,213
	16	$I_H$	0	0	0	2,312	2,675	2,736	2,696	2,619	2,528	2,432	2,339	2,249
	17	$I_H$	0	0	0	2,375	2,734	2,790	2,746	2,665	2,569	2,471	2,375	2,283
	18	$I_H$	0	0	0	2,434	2,790	2,842	2,794	2,708	2,610	2,508	2,410	2,315
	19	$I_H$	0	0	0	2,491	2,844	2,891	2,838	2,749	2,647	2,543	2,442	2,346
	20	$I_H$	0	0	0	2,545	2,895	2,937	2,881	2,788	2,683	2,576	2,473	2,375

Таблиця 15 – Значення інформаційної ємності найквістового елемента при  $m \in (4 \div 15), S \in 2 \div 20, i = 8$ .

$i$	$S$	$m$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	2	$I_H$	0	0	0	0	0	0,610	0,895	1,050	1,138	1,186	1,210	1,219
	3	$I_H$	0	0	0	0	0	0,818	1,155	1,324	1,412	1,454	1,470	1,469
	4	$I_H$	0	0	0	0	0	0,995	1,365	1,540	1,624	1,659	1,666	1,657
	5	$I_H$	0	0	0	0	0	1,148	1,542	1,718	1,797	1,825	1,825	1,807
	6	$I_H$	0	0	0	0	0	1,284	1,694	1,870	1,944	1,965	1,957	1,933
	7	$I_H$	0	0	0	0	0	1,406	1,829	2,003	2,071	2,085	2,071	2,041
	8	$I_H$	0	0	0	0	0	1,517	1,949	2,121	2,183	2,192	2,172	2,136
	9	$I_H$	0	0	0	0	0	1,619	2,058	2,226	2,283	2,286	2,261	2,220
	10	$I_H$	0	0	0	0	0	1,713	2,157	2,322	2,374	2,372	2,342	2,296
8	11	$I_H$	0	0	0	0	0	1,801	2,248	2,410	2,457	2,450	2,415	2,366
	12	$I_H$	0	0	0	0	0	1,883	2,333	2,491	2,534	2,522	2,483	2,429
	13	$I_H$	0	0	0	0	0	1,959	2,411	2,566	2,604	2,588	2,545	2,488
	14	$I_H$	0	0	0	0	0	2,032	2,485	2,636	2,670	2,650	2,603	2,542
	15	$I_H$	0	0	0	0	0	2,100	2,554	2,702	2,732	2,707	2,657	2,593
	16	$I_H$	0	0	0	0	0	2,165	2,620	2,764	2,790	2,762	2,708	2,641
	17	$I_H$	0	0	0	0	0	2,227	2,681	2,823	2,845	2,813	2,755	2,686
	18	$I_H$	0	0	0	0	0	2,286	2,740	2,878	2,896	2,861	2,801	2,728
	19	$I_H$	0	0	0	0	0	2,342	2,796	2,930	2,945	2,907	2,843	2,769
	20	$I_H$	0	0	0	0	0	2,396	2,849	2,980	2,992	2,951	2,884	2,807

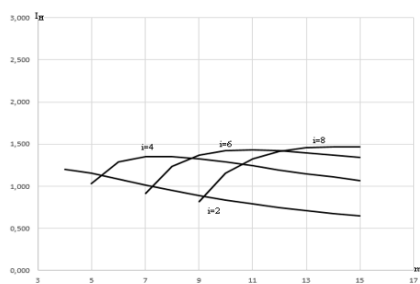


Рисунок 11 – Залежність інформаційної ємності найквістового елемента від довжини m TСК при  $s = 3$

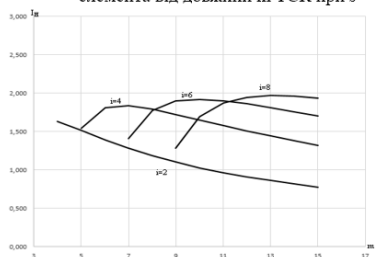


Рисунок 12 – Залежність інформаційної ємності найквістового елемента від довжини m TСК при  $s = 6$

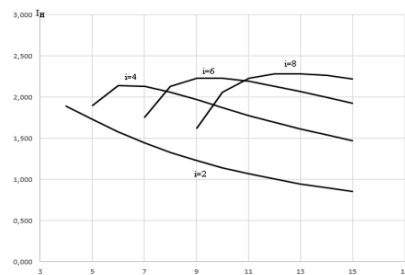


Рисунок 13 – Залежність інформаційної ємності найквістового елемента від довжини m TСК при  $s = 9$

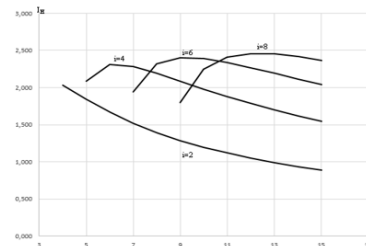


Рисунок 14 – Залежність інформаційної ємності найквістового елемента від довжини m TСК при  $s = 11$

У разі використання масово двійкового позиційного кодування ентропія кодового слова (кодової конструкції) визначається кількістю реалізацій кодових конструкцій:

$$H = \log_2 N_p \quad (17)$$

Таблиця 16 – Значення ентропії кодових слів при тривалостях  $m$   
( $m \in 4 \div 15$ ) для  $i=2$  та  $S(=3,5,7,9,11,13,15,17,19)$

$i$	$S$	$m$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	3	$N_{pr}$	4,807	5,781	6,508	7,087	7,570	7,983	8,344	8,665	8,954	9,217	9,457	9,679
	5	$N_{pr}$	6,044	7,087	7,852	8,455	8,954	9,379	9,750	10,07	10,37	10,64	10,88	11,11
	7	$N_{pr}$	6,907	7,983	8,765	9,379	9,886	10,31	10,69	11,02	11,32	11,58	11,83	12,06
	9	$N_{pr}$	7,570	8,665	9,457	10,07	10,58	11,02	11,39	11,73	12,03	12,30	12,55	12,77
2	11	$N_{pr}$	8,109	9,217	10,01	10,64	11,15	11,58	11,96	12,30	12,60	12,87	13,12	13,35
	13	$N_{pr}$	8,562	9,679	10,48	11,11	11,62	12,06	12,44	12,77	13,07	13,35	13,59	13,82
	15	$N_{pr}$	8,954	10,07	10,88	11,51	12,03	12,46	12,85	13,18	13,48	13,75	14,02	14,23
	17	$N_{pr}$	9,299	10,42	11,23	11,86	12,38	12,82	13,20	13,54	13,84	14,12	14,37	14,59
	19	$N_{pr}$	9,607	10,74	11,55	12,18	12,70	13,14	13,52	13,85	14,16	14,43	14,68	14,91

Таблиця 17 – Значення ентропії кодових слів при тривалостях  $m$   
( $m \in 4 \div 15$ ) для  $i=6$  та  $S(=3,5,7,9,11,13,15,17,19)$

$i$	$S$	$m$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	3	$N_{pr}$	0	0	0	6,39	9,85	12,29	14,18	15,73	17,04	18,18	19,18	20,08
	5	$N_{pr}$	0	0	0	8,85	12,97	15,73	17,81	19,49	20,89	22,10	23,16	24,10
	7	$N_{pr}$	0	0	0	10,74	15,24	18,18	20,36	22,10	23,55	24,79	25,87	26,84
	9	$N_{pr}$	0	0	0	12,29	17,04	20,08	22,32	24,10	25,58	26,84	27,94	28,91
6	11	$N_{pr}$	0	0	0	13,60	18,52	21,64	23,92	25,73	27,22	28,49	29,60	30,58
	13	$N_{pr}$	0	0	0	14,73	19,79	22,96	25,27	27,09	28,60	29,88	30,99	31,98
	15	$N_{pr}$	0	0	0	15,73	20,89	24,10	26,44	28,28	29,79	31,07	32,20	33,19
	17	$N_{pr}$	0	0	0	16,62	21,87	25,11	27,46	29,31	30,83	32,13	33,25	34,25
	19	$N_{pr}$	0	0	0	17,43	22,75	26,02	28,38	30,24	31,77	33,06	34,19	35,19

Таблиця 18 – Значення ентропії кодових слів при тривалостях  $m$   
( $m \in 4 \div 15$ ) для  $i=4$  та  $S(=3,5,7,9,11,13,15,17,19)$

$i$	$S$	$m$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	3	$N_{pr}$	0	5,13	7,71	9,48	10,83	11,92	12,84	13,63	14,32	14,94	15,50	16,01
	5	$N_{pr}$	0	6,98	9,97	11,92	13,38	14,54	15,50	16,33	17,05	17,69	18,27	18,80
	7	$N_{pr}$	0	8,37	11,58	13,63	15,13	16,33	17,32	18,16	18,90	19,55	20,13	20,67
	9	$N_{pr}$	0	9,48	12,84	14,94	16,48	17,69	18,69	19,55	20,29	20,95	21,54	22,08
4	11	$N_{pr}$	0	10,41	13,87	16,01	17,57	18,80	19,81	20,67	21,41	22,08	22,67	23,21
	13	$N_{pr}$	0	11,22	14,74	16,91	18,49	19,72	20,74	21,60	22,35	23,02	23,61	24,15
	15	$N_{pr}$	0	11,92	15,50	17,69	19,28	20,52	21,54	22,41	23,16	23,83	24,43	24,97
	17	$N_{pr}$	0	12,55	16,17	18,38	19,97	21,22	22,24	23,11	23,87	24,54	25,13	25,68
	19	$N_{pr}$	0	13,11	16,77	18,99	20,59	21,84	22,87	23,74	24,50	25,17	25,77	26,32

Таблиця 19 – Значення ентропії кодових слів при тривалостях  $m$   
( $m \in 4 \div 15$ ) для  $i=8$  та  $S(=3,5,7,9,11,13,15,17,19)$

$i$	$S$	$m$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 <td>11</td> <td>12</td> <td>13</td> <td>14</td> <td>15</td>	11	12	13	14	15
	3	$N_{pr}$	0	0	0	0	0	7,37	11,55	14,57	16,94	18,90	20,38	22,03
	5	$N_{pr}$	0	0	0	0	0	10,33	15,42	19,90	21,57	23,73	25,54	27,11
	7	$N_{pr}$	0	0	0	0	0	12,65	18,29	22,03	24,85	27,11	29,00	30,62
	9	$N_{pr}$	0	0	0	0	0	14,57	20,58	24,49	27,40	29,72	31,65	33,30
8	11	$N_{pr}$	0	0	0	0	0	16,21	22,48	26,51	29,49	31,85	33,81	35,49
	13	$N_{pr}$	0	0	0	0	0	17,63	24,11	28,23	31,25	33,64	35,63	37,32
	15	$N_{pr}$	0	0	0	0	0	18,90	25,54	29,72	32,78	35,20	37,19	38,90
	17	$N_{pr}$	0	0	0	0	0	20,04	26,81	31,05	34,14	36,57	38,58	40,29
	19	$N_{pr}$	0	0	0	0	0	21,08	27,96	32,23	35,34	37,79	39,81	41,53

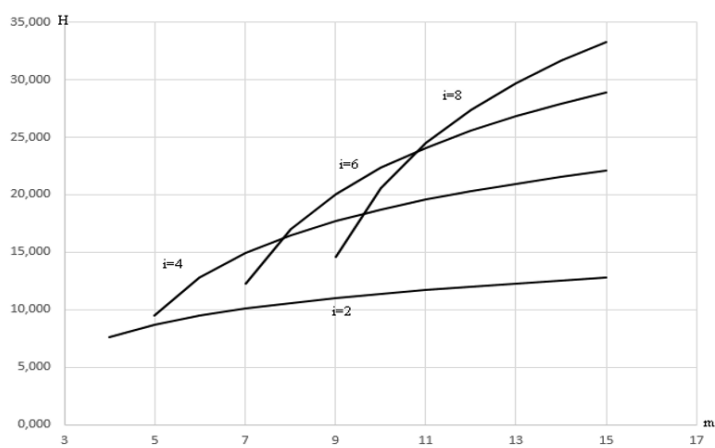


Рисунок 15 – Залежність ентропії кодівих слів від тривалості  $m$  при  $S=9$

#### 4 ЕФЕКТИВНІСТЬ ТАЙМЕРНИХ СИГНАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ РОБОТІ В РЕАЛЬНИХ КАНАЛАХ ЗВ'ЯЗКУ

##### 4.1 Ефективність використання ТСК для трансформації якості у швидкість передавання

Для оцінки ефективності використання таймерних сигналів для трансформації якості приймання у швидкість передавання інформації знайдемо зону  $\Delta$ , яку необхідно забезпечити при синтезі ТСК для отримання ймовірності помилкового приймання  $P_{\text{пт}}$  більше ніж при використанні надлишкової швидкості модуляції  $P_{\text{н}}$  ( $P_{\text{т}} < P_{\text{н}}$ ).

Відношення сигнал/шум в каналі зменшується через з'явлення міжсимвольну інтерференцію. Це зменшення ілюструється графіком  $h^* = f(h)$  для різних  $\mu$ .

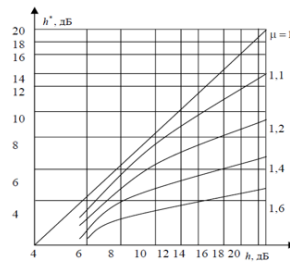


Рисунок 16 – Вплив флуктуаційного шуму на момент спрацьовування безінерційного реле

Вважаючи, що в каналі зв'язку з ЧМ, як і в попередньому прикладі, існує гауссівський шум із параметром  $h = \frac{u_c}{u_s} = 10$ . При збільшенні швидкості модуляції на 25 % (при базі сигналу  $B = \Delta F t_0 = 1$ ) за рахунок додаткових міжсимвольних завад нове співвідношення значення  $h^* = 4$  (дб) (див. рис. 16).

Для ймовірності помилкового приймання одного елемента розрядно-цифрових кодів маємо:

$$P_e = 0,65 \exp \left[ -0,44(z + 0,75)^2 \right]. \quad (18)$$

Для  $h = 10$  отримаємо  $P_e = 10^{-12}$ , а для  $h^* = 4$  за наднайквістової швидкості  $P_{en} = 1 \cdot 10^{-2}$  (де  $P_e$  і  $P_{en}$  – ймовірності помилки при найквістової і наднайквістової швидкості відповідно).

У зв'язку з тим, що в каналі з ЧМ  $\sigma_s = 1/4h$ , то є можливість оцінити величину зони  $\Delta$ . Для каналу з  $h = 10$   $\sigma_s = \frac{1}{4 \cdot 10} = 2,5\%$  для отримання нерівності  $P(\frac{\Delta}{2}) \leq P_{en} \approx 1 \cdot 10^{-2}$  достатньо вибрати зону  $\Delta = 0,2t_0$  ( $s = 6$ ), яка забезпечить ймовірність помилкового приймання одного ЗМВ – (1)  $P_{zm}^{(1)} = 1 \cdot 10^{-2}$ .

Таблиця 20 – Кількість реалізацій ТСК для  $m \in 8,9$  при  $s=2;4;6;8;10;12;14;16;18;20$

$\begin{matrix} s \\ m \end{matrix}$	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
8	36	330	1716	6435	19448	50388	116280	245157	480700	888030
	4,02	4,3	4,5	4,67	4,76	5,11	5,3	5,49	5,52	5,596
9	330	6434	50388	245157	888030	2629275	6724520	15380937	32224114	62891499
	5	5,4	5,67	5,85	6	6,44	6,68	6,83	6,96	7,05

Із таблиці видно, що при передаванні байта ( $m = 8$ ) при  $s = 12$  можна реалізувати 50388 сигнальних конструкцій, які відповідають 16-елементним бінарним кодовим словам  $E^- = (\log_2 50388) = 16$ .

У зв'язку з тим, що за наднайквістової швидкості з коефіцієнтом 1,25 на інтервалі ( $T_c = 8t_0$ ) можна сформулювати всього  $(8 \times 1,25) = 12$ -елементні кодові слова, а при ТСК – 16-елементні, тоді формування ТСК більш ефективне за критерієм швидкості передавання.

Вважаючи, що суми гауссівської завади та міжсимвольних спотворень описується нормальним законом, імовірність вірного приймання при передаванні з наднайквістовою швидкістю буде

$$P_{en} = (1 - P_{en})^{n^*} = (0,99)^{12} = 0,886, \quad (19)$$

де  $n^*$  - число елементів у кодовій слові на інтервалі байта за наднайквістової швидкості.

При ТСК інформація міститься в числі ЗММ кодової конструкції та місця їх розміщення. Тому що середнє число ЗММ на інтервалі  $T_c = 8t_c$  при  $s = 12$  дорівнює  $\bar{r} = 4,56$ , то:

$$P_{em} = (1 - P_{zm})^{4,56} = 1 - 1 \cdot 10^{-2} = 0,955. \quad (20)$$

Згідно з табл. 20 видно, що число реалізацій при  $s = 10$  і  $m = 8, N_p = 19448$ , що відповідає 14-елементному кодовому слову ( $\log_2 19448 = 14$ ).

## ВИСНОВКИ

1. У двійковому каналі на  $m$ -елементному інтервалі часу, за рахунок значення  $\Delta(s)$  можливо отримати одне й те саме число реалізацій таймерних сигнальних конструкцій на різних інтервалах часу  $T_{ск}$ .
2. При збільшенні  $S$  з 2 до 9 зростає число реалізацій ТСК та пропускна здатність каналу. При  $s = 2$  та збільшенні  $m$  з 7 до 9 пропускна здатність каналу зростає на 15,2%. При  $s = 9$  та збільшенні  $m$  з 7 до 9 пропускна здатність каналу зростає на 0,93%(відношення сигнал/завада  $h = 8$ ).
3. При збільшенні  $S$  з 2 до 9 зростає число реалізацій ТСК та пропускна здатність каналу. При  $s = 2$  та збільшенні  $m$  з 7 до 9 пропускна здатність каналу зростає на 16%. При  $s = 9$  та збільшенні  $m$  з 7 до 9 пропускна здатність каналу зростає на 0,2%(відношення сигнал/завада  $h = 5$ ).
4. Максимальна пропускна здатність каналу зв'язку( $C_{max}=2,417$  дв.од./с) досягається за умови, що  $t_0=0,9575c$ ,  $m=7$ ,  $N_0\Sigma=992687$ .
5. При зростанні швидкості передачі інформації  $R$  відношення сигнал/шум на вході приймача зменшується, в результаті чого зростає ймовірність бітової помилки  $P_b$ . При швидкості  $R = 100$  Мбіт/с при температурі шумів  $T_0 = 284K$ , потужності сигналу на вході приймача  $P_c = -105$  дБВт, відношення сигнал/шум складає  $E_b/N_0 = 10,15$ . При збільшенні швидкості  $R$  з 100 Мбіт/с до 160 Мбіт/с відношення сигнал/шум зменшиться на 37,4% і становитиме  $E_b/N_0 = 6,35$ , а ймовірність бітової помилки  $P_b$  збільшиться з  $0,32 \cdot 10^{-5}$  до  $1,83 \cdot 10^{-4}$ .
6. Зростання рівня потужності сигналу на вході приймача  $P_c$  призводить до збільшення відношення сигнал/шум на вході приймача, в результаті чого ймовірність бітової помилки  $P_b$  зменшується. При потужності сигналу  $P_c = -110$  дБВт при температурі шумів  $T_0 = 285K$ , швидкості передачі інформації  $R = 160$  Мбіт/с, відношення сигнал/шум складає  $E_b/N_0 = 2$ . При збільшенні потужності сигналу  $P_c$  з -110 дБВт до -100 дБВт відношення сигнал/шум зростає на і становитиме 20,01, а ймовірність бітової помилки  $P_b$  зменшиться з  $2,27 \cdot 10^{-2}$  до  $1,25 \cdot 10^{-10}$ .

7. Зростання шумової температури  $T$  зменшує відношення сигнал/шум на вході приймача, в результаті чого зростає ймовірність бітової помилки  $P_b$ . При температурі  $T = 284$  К, потужності сигналу на вході приймача  $P_c = -105$  дБВт, швидкості передачі інформації  $R = 100$  Мбіт/с, відношення сигнал/шум складає  $E_b/N_0 = 10,16$ . При збільшенні температури шумів з 284 К до 309 К відношення сигнал/шум зменшиться на 8,1 % і становитиме 9,34, а ймовірність бітової помилки  $P_b$  збільшиться з  $4,71 \cdot 10^{-6}$  до  $7,73 \cdot 10^{-6}$ .

8. При зменшенні параметра  $S$  падає інформаційна ємність найквістового елемента. Наприклад, при  $i = 5$ ,  $m = 10$ ,  $s = 10$  інформаційна ємність  $I_H = 2,173$  біт на елемент, а при  $s = 9$ ,  $i = 5$ ,  $m = 10$ ,  $I_H = 2,101$  біт на елемент. В даному випадку інформаційна ємність зменшується на 3,3% при ймовірності бітової помилки не гірше  $5 \cdot 10^{-5}$ .

9. При збільшенні  $S$  з 9 до 12 збільшується інформаційна ємність і зростає число реалізацій  $N_{PT}$  з 2118760 до 8259888, що підвищує ймовірність бітової помилки ( $P_{\text{пом}} > 10^{-5}$ ) та призводить до зниження якості передачі цифрової інформації.

10. На інформаційну ємність найквістового елемента  $I_H$  впливає кількість переходів "1" в таймерних сигнальних конструкціях. Збільшення числа заданих відрізків сигналу на інтервалі кодового слова  $i \in (1; 8)$  дає змогу підвищити показник інформаційної ємності  $I_H$ , але при  $i \rightarrow m - 1$  значення  $I_H$  падає. Максимальне значення інформаційної ємності досягається при  $i = 8$ . Якщо  $i = 8$ ,  $m = 12$  при  $s = 20$ , то  $I_H = 2,992$  біт на елемент, але при цьому ймовірність помилкового прийому  $P_{\text{пом}} > 10^{-5}$ , що призводить до зниження якості передачі цифрової інформації. Рациональне значення інформаційної ємності можна отримати при  $s = 17$ ,  $m = 12$ ,  $i = 8$  тоді,  $I_H = 2,845$  біт на елемент, що дозволяє забезпечити високу якість передачі інформації ( $P_{\text{пом}} < 10^{-5}$ ).

11. Порівнюючи ймовірність вірного приймання при передаванні з найквістовою швидкістю ( $P_{\text{вн}}$ ) і ймовірністю втрати інформації ( $P_{\text{вт}}$ ) видно, що при таймерних сигнальних конструкціях при порівнянні 16-елементного кодового слова до 12-елементного кодового слова  $\left(\frac{16}{12}\right)$  швидкість передавання більше в 1,33 разів. Зменшення швидкості передавання таймерних сигнальних конструкцій з 16-елементного кодового слова до 14-елементного кодового слова  $\left(\frac{16}{14}\right)$  на 14% збільшує функцію правдоподібності приймання конструкцій.

12. При моделюванні таймерних сигнальних конструкцій досягнуто підвищення ефективності пропускної здатності каналу зв'язку на 8,22% в умовах дії флуктуаційних завад при вказаній ймовірності бітових помилок для забезпечення заданої якості зв'язку.

## Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальне співпадіння з одним документом 13.0%

Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Помилки в документах: 13%

ID: 82470 Назва: Моделювання таймерних сигнальних конструкцій як інструментарій збільшення пропускну здатності каналу зв'язку в умовах дії завад при заданій якості прийому інформації Додано в БД: 2020-12-04 Автора: Т.Л. Гончарук Керівники: В.І. Лужанський Консультанти: Опоненти: Ю.М. Бойко	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	74796	634	10250 (14%)	84 (13%)

## Джерело плагиату

ID	Опис	Наявність плагиату в документі	
		Символи	Лексеми
55977	Назва: Моделювання заводозахищеності цифрових систем передачі на основі розширення спектру в таймерних сигнальних конструкцій Додано в БД: 2018-12-05 Автора: Шашков Дмитро Геннадійович Керівники: Лужанський Віктор Ігорович Консультанти: Опоненти:	9832 (13.0%)	96 (15.0%)



Ім'я користувача:  
Кафедра АКПІТК

ID перевірки:  
1005431666

Дата перевірки:  
11.12.2020 12:16:48 EET

Тип перевірки:  
Doc vs Internet

Дата звіту:  
11.12.2020 12:28:21 EET

ID користувача:  
100005862

Назва документа: Диплом Гончарук\_плагиат3

Кількість сторінок: 71 Кількість слів: 6134 Кількість символів: 44643 Розмір файлу: 4.31 MB ID файлу: 1005723007

Виявлено модифікації тексту (можуть впливати на відсоток схожості)

**1.7%**  
**Схожість**

Найбільша схожість: 0.83% з Інтернет-джерелом (<http://elar.khnu.km.ua/jspui/bitstream/123456789/9387/1/KRUSHYNSK>)

1.7% Джерела з Інтернету

20

Сторінка 73

Пошук збігів з Бібліотекою не проводиться

**0% Цитат**

Вилучення цитат вимкнено

Вилучення списку бібліографічних посилань вимкнено

**0%**  
**Вилучень**

Немає вилучених джерел

**Модифікації**

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Підозріле форматування

20 сторінок

## РЕЦЕНЗІЯ

на дипломну роботу

*«Моделювання таймерних сигнальних конструкцій як інструментарій збільшення пропускної здатності каналу зв'язку в умовах дії завад при заданій якості прийому інформації»*

студента групи ТРМ-19-1 Гончарука Тараса Леонідовича

Дипломна робота та її зміст повністю відповідають завданню. Сформульовані мета, об'єкт та предмет дослідження свідчать про актуальність теми – моделювання таймерних сигнальних конструкцій як інструментарій збільшення пропускної здатності каналу зв'язку в умовах дії завад при заданій якості прийому інформації.

Дипломна робота виконана відповідно до перспективних планів наукової роботи, кафедри автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій і телекомунікацій університету з тематики подальшого розвитку таймерних сигнальних конструкцій для збільшення пропускної здатності каналу зв'язку.

Метою роботи є оцінка ефективності використання таймерних сигнальних конструкцій для збільшення пропускної здатності каналу зв'язку в умовах дії флукуаційних завад при заданій ймовірності помилкового прийому інформації.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що автором надані науково-обґрунтовані рекомендації щодо використання удосконаленого методу оцінки пропускної здатності каналу зв'язку, інформаційної ємності та ентропії кодового слова, що надає змогу використовувати його в радіотехнічних та телекомунікаційних системах на основі таймерних сигнальних конструкцій для підвищення показників завадостійкості.

Результати дипломної роботи можуть бути використані для підвищення завадостійкості та пропускної здатності каналу зв'язку, достовірності переданої інформації при використанні таймерних сигнальних конструкцій в умовах дії завад. В цілому зміст роботи відповідає темі, вся інформація подана у роботі є достовірною. До недоліків роботи можна віднести деякі стилістичні помилки, які суттєво не впливають на її науково-технічну цінність.

Робота викладена науковою мовою, логічно й послідовно. Пояснювальна записка відповідає стандартам до її оформлення.

Робота Гончарука Тараса Леонідовича відповідає вимогам, які висуваються до дипломної роботи і може бути оцінена на оцінку «Відмінно».

**Рецензент:**

доктор технічних наук, професор

**Бойко Ю.М.**" 11 " листопада 2020 р.

Завідувачу кафедри  
проф. Мартинюку В.В.  
здобувача вищої освіти (студента ПІБ,  
факультет, «курс», «група»)  
Гончарука Т.Л., ФПКТС, другий курс  
магістратури, ТРМ-19-1

### ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2020 (зі змінами від 26.11.2020), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений. Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

03 грудня 2020р.  
дата

  
підпис

## РІШЕННЯ КАФЕДРИ

**АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

## ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Моделювання таймерних сигнальних конструкцій як інструментарій збільшення пропускнуої здатності каналу зв'язку в умовах дії завад при задній якості прийому інформації.

Автор: **Гончарук Тарас Леонідович**

Спеціальність: **172 Телекомунікації та радіотехніка**

Освітня програма: Телекомунікації та радіотехніка

Науковий керівник: **д.т.н. проф. Лужанський Віктор Ігорович**

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту.	<b>Відповідно</b>
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укріття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження: Запозичення у розмірі 14%, виявлені в роботі відповідають тексту стандартних бланків та списку літератури, решта запозичень є випадковими, або на них є посилання, тому ці запозичення не є плагіатом, бо вони не стосуються наукової новизни і практичної значущості роботи.

3.12.2020р.

Науковий керівник роботи:

Зав. каф. АКПТК

Лужанський В.І.

Мартинюк В.В.