

В.І. ЛУЖАНСЬКИЙ, Л.В. КАРПОВА, А.О. ЛЮЛЬЧУК
Хмельницький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ БЛОКОВИХ КОДІВ В УМОВАХ ЗМІНИ ШВИДКОСТІ КОДУ, ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАЧІ ЦИФРОВИХ ПОТОКІВ ІНФОРМАЦІЇ ТА ТЕМПЕРАТУРИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАНОЇ ЯКОСТІ ЗВ'ЯЗКУ

Стаття присвячена дослідженню завадостійкості блокових коректувальних кодів в системах зв'язку з двійковою фазовою модуляцією ФМ-2 при їх декодуванні в умовах впливу зміни швидкості блокових кодів, швидкості передачі цифрових потоків інформації та температури навколишнього середовища. Проведено дослідження завадостійкості блокових коректувальних кодів, призначених для використання в сучасних телекомунікаційних системах. Проаналізовано введення надмірності при кодуванні блокових кодів на зміну витрат смуги частот на передавання кодованих сигналів та знаходження ймовірності бітової помилки при декодуванні циклічних кодів у двійковому симетричному каналі. Проведені розрахунки щодо визначення необхідного співвідношення сигнал/шум, мінімально та максимально допустимої потужності сигналу на вході приймача при швидкості передачі цифрових потоків інформації 5 Мбіт/с, 100 Мбіт/с та 500 Мбіт/с, які забезпечують високу якість зв'язку в межах ймовірності бітової помилки 10^{-7} - 10^{-9} . Надані науково обґрунтовані висновки щодо завадостійкого використання блокових кодів в телекомунікаційних системах в умовах зміни швидкості блокових кодів, швидкості передачі даних, температури навколишнього середовища та дії завад.

Ключові слова: блокові коди, завадостійкість, швидкість блокових кодів, швидкість передачі цифрової інформації, співвідношення сигнал/шум, ймовірність бітової помилки.

V.I. LUZHANSKIY, L.V. KARPOVA, A.O. LYULCHUK
Khmelnytskyi National University

RESEARCH NOISE IMMUNITY OF BLOCK CODES IN THE CONDITIONS OF CHANGE OF CODES SPEED, SPEED OF DIGITAL FLOWS OF INFORMATION AND ENVIRONMENTAL TEMPERATURE FOR PROVISION OF PROVIDED COMMUNICATION QUALITY

The article is devoted to the study of noise immunity of block correction codes in communication systems with PM-2 binary phase modulation when they are decoded under the influence of changes in the speed of block codes, the transmission speed of digital information streams and the ambient temperature. Research of the noise immunity of block correction codes for use in modern telecommunication systems has been conducted. Analysed the introduction of redundancy when coding block codes to change the cost of the frequency band for transmitting coded signals and finding the probability of bit error when decoding cyclic codes in a binary symmetric channel. Carried out calculations to determine the required signal-to-noise ratio, the minimum and maximum allowable signal power at the receiver input at a transmission rate of digital information streams of 5 Mbit/s, 100 Mbit/s and 500 Mbit/s, which ensure high quality of communication within the probability of bit error 10^{-7} - 10^{-9} . Research was conducted to determine the required signal-to-noise ratio, the minimum and maximum allowable signal power at the receiver input at a transmission rate of 500 Mbit/s when the ambient temperature changes, which provide high quality information transmission with a bit error rate of 10^{-7} - 10^{-9} . Provided scientifically-based conclusions regarding the robust use of block codes in telecommunication systems in the face of changes in the rate of block codes, data transfer rate, ambient temperature and the effect of interference.

Keywords: block codes, noise immunity, block code speed, digital rate of transmission, signal/noise ratio, bit error rate.

Вступ

В сучасних телекомунікаційних системах інформація, як правило, передається в цифровому виді й обробляється цифровими методами. При цьому важливу роль відіграють методи завадостійкого кодування інформації. Підвищення швидкості передачі цифрової інформації вимагає від телекомунікаційних систем високої завадостійкості при відповідному співвідношенні сигнал/шум на вході приймача та ймовірності бітової помилки для забезпечення заданої якості зв'язку.

Аналіз стану досліджень та публікацій. Аналіз літературних джерел ([1–4] та ін.) показує недостатність проведених досліджень у цьому напрямку.

Метою даної роботи є дослідження завадостійкості блокових кодів в умовах зміни швидкості коду, швидкості передачі цифрових потоків інформації та температури навколишнього середовища для забезпечення заданої якості зв'язку.

Результати дослідження. Знайдемо ймовірність бітової помилки помилки при декодуванні блокових кодів у двійковому симетричному каналі. Для цього розглянемо кодування блоковим кодом (n – кількість символів (знаків) у кодовій комбінації; k – кількість інформаційних символів) з кодовою відстанню d_{\min} . У такому каналі помилки в послідовно переданих кодових символах відбуваються незалежно з імовірністю p . Тоді ймовірність того, що на довжині блоку n відбудеться q помилок, дорівнює [1, 2]:

$$P(q) = C_n^q p^q (1-p)^{n-q}, \quad (1)$$

де C_n^q – число сполучень із n елементів по q . Якщо код виправляє всі помилки кратності

$q_{\text{випр}} = (d_{\text{min}} - 1) / 2$ (d_{min} – непарна) і менш, то ймовірність одержання на виході декодера блоку з не виправленими помилками визначається за формулою:

$$P_{n,\text{д}} \leq \sum_{q=q_{\text{випр}}+1}^n P(q) \tag{2}$$

Отже, ймовірність помилкового декодування блоку буде розраховуватись:

$$P_{n,\text{д}} \leq \sum_{q=q_{\text{випр}}+1}^n C_n^q p^q (1-p)^{n-q} \tag{3}$$

У цьому виразі рівність має місце, за умовою використання досконалого коду. Співвідношення між параметрами n , k і $q_{\text{випр}}$ визначаються конкретним обранням коду. Вираз (3) дозволяє знайти верхню оцінку ймовірності помилки декодування блоку при використанні блокових кодів у двійковому симетричному каналі без пам'яті. Для визначення ймовірності помилки в кожному інформаційному (або додатковому) символі необхідно знати використовуваний алгоритм декодування й структуру коректувального коду, зокрема, набір відстаней від переданої кодової комбінації до всіх дозволених комбінацій. Для розрахунків ймовірності помилкового декодування кодових символів (інформаційних або додаткових) використовують наближену формулу [3]:

$$p_{\text{д}} = \frac{d_{\text{min}}}{n} \sum_{q=q_{\text{випр}}+1}^n C_n^q p^q (1-p)^{n-q} \tag{4}$$

Для каналів з когерентним прийманням сигналів двійкової фазової модуляції (ФМ-2) ймовірність бітової помилки сигналу розраховують за формулою:

$$p = Q(\sqrt{2}h_s) \tag{5}$$

де $h_s^2 = E_s / N_0$ – відношення енергії двійкового сигналу E_s до спектральної густини потужності шуму N_0 на вході демодулятора;

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} \exp(-\frac{t^2}{2}) dt$$

– гаусова Q -функція, таблиці значень якої містять довідники з теорії ймовірностей і статистичних розрахунків.

Введення надмірності при використанні коректувального кодування призводить до розширення смуги частот, зайнятої сигналом. Так, якщо смуга частот у системі без кодування становила ΔF_s (Гц), то застосування коду зі швидкістю $R_{\text{код}} = k/n$ вимагає розширення смуги частот до величини:

$$F_{\text{код}} = \frac{\Delta F_s}{R_{\text{код}}}, \tag{6}$$

тобто відбувається розширення смуги частот у $K_F = n/k$ раз. Для кодів з низькою швидкістю ($n/k \gg 1$) таке розширення може виявитися відчутним. Тому задача вибору коду при проектуванні телекомунікаційної системи полягає в пошуку компромісу між бажаними ступенем підвищення завадостійкості й неминучим розширенням смуги частот кодованого сигналу.

Аналіз результатів розрахунків ймовірності бітової помилки декодування за формулами (4) і (5) дозволяє зробити висновки щодо ефективності застосування завадостійкого кодування [1]:

1. З ростом довжини кодової комбінації n ймовірність бітової помилки декодування $p_{\text{д}}$ знижується.
2. Коди з великою надмірністю (малою швидкістю коду $R_{\text{код}}$) забезпечують суттєве зниження ймовірності помилки декодування.
3. При використанні коректувальних кодів у телекомунікаційних системах платою за підвищення завадостійкості є розширення смуги частот переданого сигналу, обумовлене надмірністю, що вводиться при кодуванні, у

$$K_F = \frac{n}{k} \text{ раз.} \tag{7}$$

Важливим є завдання доцільності застосування коректувальних кодів для підвищення завадостійкості передавання інформації каналами телекомунікаційних систем.

Введення надмірності при кодуванні змінює витрати смуги частот на передавання кодованих сигналів, вимагаючи при цьому урахування надмірності при виконанні енергетичних розрахунків. Згідно з формулою (5) ймовірність бітової помилки каналних сигналів (кодових символів) визначається їхньою енергією E_s , що з урахуванням надмірності коду витрачається менше енергії E_{σ} на передавання одного інформаційного символу (біта). Це отримується з рівності $kE_{\sigma} = nE_s$, тобто $E_s = E_{\sigma} R_{\text{код}}$. У всіх енергетичних розрахунках систем з кодуванням використовують величину відношення енергії сигналу,

затрачуваної на передавання одного інформаційного двійкового символу (біта) до спектральної густини потужності шуму E_{σ}/N_0 . Імовірність помилкового декодування блоку розраховується за формулами (3) і (4), у яких в аргумент функції $Q(z)$ входить величина E_s – енергія сигналу, яка витрачається на передавання каналом одного кодового символу. При кодуванні зі швидкістю $R_{код} = k/n$ енергія сигналу може бути представлена як $E_s = E_b R_{код}$, де E_b – енергія сигналу, яка витрачається на передавання одного двійкового інформаційного символу (біта). Отже, відношення енергії E_b до спектральної густини потужності шуму N_0 можна позначити як $h_{\sigma}^2 = E_b/N_0$, яке використовується в енергетичних розрахунках телекомунікаційних систем. Враховуючи взаємозв'язок енергії сигналу E_s і енергії E_b величина, що входить у розрахункову формулу (5), буде $h^2 = R_{код} h_{\sigma}^2$.

Тоді з урахуванням витрат енергії на передавання додаткових символів надлишкового коду формулу (5) можна записати так:

$$p = Q(\sqrt{2R_{код} h_{\sigma}^2}), \quad (8)$$

на основі чого ймовірність помилкового декодування біта може бути оцінена виразом:

$$p_{\partial} = \frac{d_{\min}}{n} \sum_{q=q_{\text{вип}}+1}^n C_n^q p^q (1-p)^{n-q}, \quad (9)$$

у якому ймовірність помилки каналного сигналу розраховується за формулою (8). При необхідності визначити ймовірність бітової помилки в каналі без кодування можна скористатися формулою (8), визначивши $R_{код} = 1$:

$$p = Q(\sqrt{2} h_{\sigma}) \quad (10)$$

Використаємо формулу (10) для розрахунку ймовірності бітової помилки оптимального приймання сигналів ФМ-2 у каналі без кодування. Результати розрахунків подані у табл. 1. Вихідним параметром для розрахунків є відношення сигнал/шум на вході демодулятора $h_{\sigma}^2 = E_b/N_0$. Зв'язок між величиною h_{σ}^2 обрховується за формулою $h_{\sigma}^2_{\text{дБ}} = 10 \lg h_{\sigma}^2$. У табл. 1 наведені розрахункові дані з визначення ймовірності бітової помилки оптимального приймання сигналів ФМ-2 (9) та аргумент z функції $Q(z)$.

Таблиця 1

Розрахунок завадостійкості приймання сигналу ФМ-2

h_{σ}^2 , дБ	h_{σ}	$R_{код}$	z	p
1	1,122	1	1,587	$5,7 \cdot 10^{-2}$
2	1,259	1	1,780	$3,7 \cdot 10^{-2}$
3	1,413	1	1,998	$2,3 \cdot 10^{-2}$
4	1,585	1	2,241	$1,3 \cdot 10^{-2}$
5	1,778	1	2,515	$6 \cdot 10^{-3}$
6	1,995	1	2,822	$2,4 \cdot 10^{-3}$
7	2,239	1	3,166	$7,9 \cdot 10^{-4}$
8	2,512	1	3,552	$1,9 \cdot 10^{-4}$
9	2,818	1	3,986	$3,5 \cdot 10^{-5}$
10	3,162	1	4,472	$3,9 \cdot 10^{-6}$
11	3,548	1	5,018	$2,7 \cdot 10^{-7}$
12	3,981	1	5,630	$9 \cdot 10^{-9}$

Крива залежності $p = f(h_{\sigma}^2)$, яка побудована за даними (ФМ-2) табл. 1, наведена на рис. 1.

Визначимо потужність сигналу на вході приймача:

$$P_c = 10^{0,1 \cdot p_c}, \quad (11)$$

де P_c – потужність сигналу на вході приймача, Вт; p_c – задана потужність на вході приймача, дБВт. Тривалість тактового інтервалу (тривалість одного біту) дорівнює:

$$T = 1 / R, \quad (12)$$

де R – швидкість передачі цифрової інформації.

Енергія, яка витрачається на передачу одного біта визначається за наступною формулою:

$$E_b = P_c \cdot T. \quad (13)$$

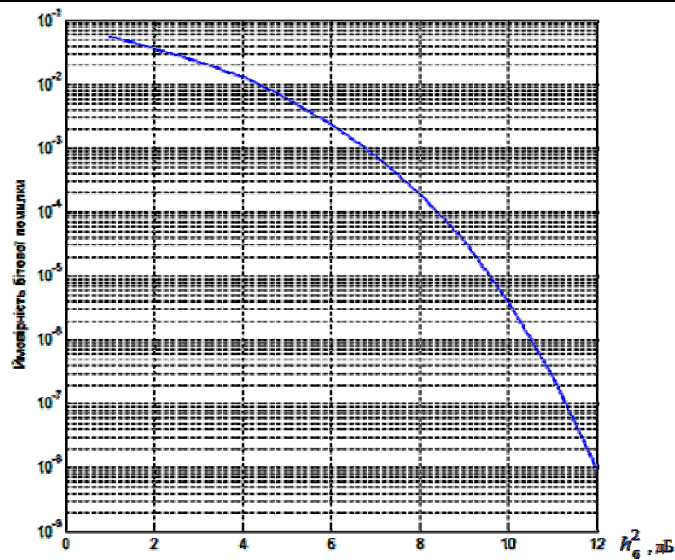


Рис. 1. Завадостійкість декодування циклічних кодів

Потужність шумів на вході приймача можна визначити по формулі [4] :

$$P_{ш.пр} = n \cdot k \cdot \Delta f_{пр}, \tag{14}$$

де n – коефіцієнт шуму приймача ($n = 10 \text{ дБ}$); $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Вт/Гц} \cdot \text{град}$ – стала Больцмана; $T_0 = 293 \text{ К}$ – шумова температура в градусах Кельвіна; $\Delta f_{пр}$ – ширина смуги пропускання приймача.

Одностороння спектральна щільність потужності білого шуму:

$$N_0 = n \cdot k \cdot T_0, \tag{15}$$

що дозволяє записати:

$$N_0 = k \cdot T_0 + n = -203.933 + 10 = -193.933 \frac{\text{дБ} \cdot \text{Вт}}{\text{Гц}}. \tag{16}$$

Отриманий результат запишемо у вигляді:

$$N_0 = 10^{-19.393} = 4.043 \cdot 10^{-20} \frac{\text{Вт}}{\text{Гц}}. \tag{17}$$

Відношення сигнал/шум на вході приймача визначається як:

$$E_b / N_0. \tag{18}$$

Ймовірність бітової помилки можна отримати за формулою:

$$P_b = Q \left(\sqrt{\frac{2 \cdot E_b}{N_0}} \right). \tag{19}$$

Визначимо ймовірність бітової помилки в системах мобільного зв'язку з фазовою маніпуляцією ФМ-2 BPSK (binary phase-shift keying – двійкова фазова маніпуляція) для забезпечення високої якості зв'язку в межах ймовірності бітової помилки $10^{-7} - 10^{-9}$.

Для швидкості передачі цифрової інформації $R = 5 \text{ Мбіт/с}$ визначимо максимально допустиму потужність сигналу ($P_{с.макс}$) на вході приймача, яка забезпечує ймовірність бітової помилки 10^{-9} .

Знаходимо Q-функцію [4] для ймовірності помилки 10^{-9} (Q(6)). За формулою (19) знаходимо значення $E_b = 7.278 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

Тривалість тактового інтервалу імпульсу дорівнює: $T = 1 / R = 1 / 5 \cdot 10^6 \text{ біт/с} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ с}$.

За формулами (11) та (13) визначимо $P_{с.макс}$.

$$P_{с.макс} = \frac{E_b}{T} = \frac{7.278 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{2 \cdot 10^{-7} \text{ с}} = 3.639 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} = -114.39 \text{ дБВт}.$$

Аналогічно знаходимо значення мінімально допустимої потужності сигналу на вході приймача при ймовірності бітової помилки 10^{-7} (Q(5.2)) [4].

$$P_{с.мін} = \frac{E_b}{T} = \frac{5.467 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{2 \cdot 10^{-7} \text{ с}} = 2.733 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} = -115.633 \text{ дБВт}.$$

Визначимо ймовірність бітових помилок в межах динамічного діапазону потужності сигналу на вході приймача ($P_{с.макс} = -114.39 \text{ дБВт}$; $P_{с.мін} = -115.633 \text{ дБВт}$).

Розрахуємо значення потужностей сигналу на вході приймача:

$$P_{с1} = 10^{0.1 \cdot (-114.39)} = 3.639 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}, \quad P_{с2} = 10^{0.1 \cdot (-115.633)} = 3.525 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c3} = 10^{0.1 \cdot (-114.666)} = 3.415 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c5} = 10^{0.1 \cdot (-114.943)} = 3.204 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c7} = 10^{0.1 \cdot (-115.219)} = 3.007 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c9} = 10^{0.1 \cdot (-115.495)} = 2.822 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c1} = P_{c.\max} = 3.639 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c4} = 10^{0.1 \cdot (-114.804)} = 3.308 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c6} = 10^{0.1 \cdot (-115.081)} = 3.104 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c8} = 10^{0.1 \cdot (-115.357)} = 2.913 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c10} = 10^{0.1 \cdot (-115.633)} = 2.733 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c10} = P_{c.\min} = 2.733 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

Тривалість одного біта дорівнює $T_1 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ с.}$

Енергія, яка витрачається на передачу одного біта, розраховується наступним чином:

$$E_{b1} = P_{c1} \cdot T_1 = 3.639 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 2 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 7.278 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b2} = P_{c2} \cdot T_1 = 3.525 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 2 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 7.05 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b3} = P_{c3} \cdot T_1 = 3.415 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 2 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 6.83 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b4} = P_{c4} \cdot T_1 = 3.308 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 2 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 6.616 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b5} = P_{c5} \cdot T_1 = 3.204 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 2 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 6.409 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b6} = P_{c6} \cdot T_1 = 3.104 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 2 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 6.208 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b7} = P_{c7} \cdot T_1 = 3.007 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 2 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 6.014 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b8} = P_{c8} \cdot T_1 = 2.913 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 2 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 5.826 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b9} = P_{c9} \cdot T_1 = 2.822 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 2 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 5.643 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b10} = P_{c10} \cdot T_1 = 2.733 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 2 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 5.467 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Потужність шумів на вході приймача :

$$N_0 = 10^{-19.393} = 4.043 \cdot 10^{-20} \frac{\text{Вт}}{\text{Гц}}.$$

Знайдемо відношення сигнал/шум на вході приймача:

$$\frac{E_{b1}}{N_0} = \frac{7.278 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{4.043 \cdot 10^{-20} \text{ Вт / Гц}} = 18.$$

$$\frac{E_{b2}}{N_0} = \frac{7.05 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{4.043 \cdot 10^{-20} \text{ Вт / Гц}} = 17.437.$$

$$\frac{E_{b3}}{N_0} = \frac{6.83 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{4.043 \cdot 10^{-20} \text{ Вт / Гц}} = 16.891.$$

$$\frac{E_{b4}}{N_0} = \frac{6.616 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{4.043 \cdot 10^{-20} \text{ Вт / Гц}} = 16.362.$$

$$\frac{E_{b5}}{N_0} = \frac{6.409 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{4.043 \cdot 10^{-20} \text{ Вт / Гц}} = 15.85.$$

$$\frac{E_{b6}}{N_0} = \frac{6.208 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{4.043 \cdot 10^{-20} \text{ Вт / Гц}} = 15.354.$$

$$\frac{E_{b7}}{N_0} = \frac{6.014 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{4.043 \cdot 10^{-20} \text{ Вт / Гц}} = 14.873.$$

$$\frac{E_{b8}}{N_0} = \frac{5.826 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{4.043 \cdot 10^{-20} \text{ Вт / Гц}} = 14.408.$$

$$\frac{E_{b9}}{N_0} = \frac{5.643 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{4.043 \cdot 10^{-20} \text{ Вт / Гц}} = 13.957.$$

$$\frac{E_{b10}}{N_0} = \frac{5.467 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{4.043 \cdot 10^{-20} \text{ Вт / Гц}} = 13.52.$$

Визначимо ймовірність бітової помилки:

$$P_{b1} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 7.278 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(6) = 0.987 \cdot 10^{-9}.$$

$$P_{b2} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 7.05 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.9) = 0.182 \cdot 10^{-8}.$$

$$P_{b3} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 6.83 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.8) = 0.312 \cdot 10^{-8}.$$

$$P_{b4} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 6.616 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.7) = 0.533 \cdot 10^{-8}.$$

$$P_{b5} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 6.409 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.6) = 0.901 \cdot 10^{-8}.$$

$$P_{b6} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 6.208 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.5) = 0.151 \cdot 10^{-7}.$$

$$P_{b7} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 6.014 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.4) = 0.252 \cdot 10^{-7}.$$

$$P_{b8} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 5.826 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.3) = 0.416 \cdot 10^{-7}.$$

$$P_{b9} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 5.643 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.2) = 0.646 \cdot 10^{-7}.$$

$$P_{b10} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 5.467 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.2) = 0.996 \cdot 10^{-7}.$$

Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача для швидкості 5 Мбіт/с

Ймовірність бітової помилки, 10^{-8}	0.0987	0.182	0.312	0.533	0.901	1.512	2.518	4.161	6.459	9.964
Потужність сигналу на вході приймача, дБВт	-114.3	-114.5	-114.6	-114.8	-114.9	-114.0	-115.2	-115.3	-115.4	-115.6
Співвідношення сигнал/шум, E_b/N_0	18	17.437	16.891	16.362	15.85	15.354	14.473	14.408	13.957	13.52

У відповідності до даних табл. 2 побудуємо графік залежності значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача (рис. 2).

Для швидкості передачі $R=100$ Мбіт/с визначимо максимально допустиму потужність сигналу ($P_{c,max}$) на вході приймача, яка забезпечує ймовірність бітової помилки 10^{-9} .

Знаходимо Q-функцію [4] для ймовірності помилки 10^{-9} (Q(6)). За формулою (19) знаходимо значення $E_b = 7.278 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Тривалість тактового інтервалу імпульсу дорівнює: $T = 1 / R = 1 / 100 \cdot 10^6 \text{ біт} / \text{с} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ с}$.

За формулами (11) та (13) визначимо $P_{c,max}$.

$$P_{c,max} = \frac{E_b}{T} = \frac{7.278 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{1 \cdot 10^{-8} \text{ с}} = 7.278 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} = -101.38 \text{ дБВт}.$$

Аналогічно знаходимо значення мінімально допустимої потужності на вході приймача при ймовірності бітової помилки 10^{-7} (Q(5.2)) [4].

$$P_{c,min} = \frac{E_b}{T} = \frac{5.467 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{1 \cdot 10^{-8} \text{ с}} = 5.467 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} = -102.623 \text{ дБВт}.$$

Визначимо ймовірність бітових помилок в межах динамічного діапазону потужності сигналу на вході приймача ($P_{c,max} = -101.38$ дБВт; $P_{c,min} = -102.623$ дБВт).

Розрахуємо значення потужностей сигналу на вході приймача:

$$\begin{aligned} P_{c1} &= 10^{0.1 \cdot (-101.38)} = 7.278 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} & P_{c2} &= 10^{0.1 \cdot (-101.518)} = 7.05 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} \\ P_{c3} &= 10^{0.1 \cdot (-101.656)} = 6.83 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} & P_{c4} &= 10^{0.1 \cdot (-101.794)} = 6.616 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} \\ P_{c5} &= 10^{0.1 \cdot (-101.932)} = 6.409 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} & P_{c6} &= 10^{0.1 \cdot (-102.07)} = 6.208 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} \\ P_{c7} &= 10^{0.1 \cdot (-102.208)} = 6.014 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} & P_{c8} &= 10^{0.1 \cdot (-102.347)} = 5.826 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} \\ P_{c9} &= 10^{0.1 \cdot (-102.485)} = 5.643 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} & P_{c10} &= 10^{0.1 \cdot (-102.623)} = 5.467 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} \\ P_{c1} &= P_{c,max} = 7.278 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} & P_{c10} &= P_{c,min} = 5.467 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} \end{aligned}$$

Тривалість одного біта дорівнює $T_2 = 1 \cdot 10^{-8} \text{ с}$.

Енергія, яка витрачається на передачу одного біта розраховується наступним чином:

$$\begin{aligned} E_{b1} &= P_{c1} \cdot T_2 = 7.278 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} \cdot 1 \cdot 10^{-8} \text{ с} = 7.278 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \\ E_{b2} &= P_{c2} \cdot T_2 = 7.05 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} \cdot 1 \cdot 10^{-8} \text{ с} = 7.05 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \\ E_{b3} &= P_{c3} \cdot T_2 = 6.83 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} \cdot 1 \cdot 10^{-8} \text{ с} = 6.83 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \\ E_{b4} &= P_{c4} \cdot T_2 = 6.616 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} \cdot 1 \cdot 10^{-8} \text{ с} = 6.616 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \\ E_{b5} &= P_{c5} \cdot T_2 = 6.409 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} \cdot 1 \cdot 10^{-8} \text{ с} = 6.409 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \\ E_{b6} &= P_{c6} \cdot T_2 = 6.208 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} \cdot 1 \cdot 10^{-8} \text{ с} = 6.208 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \\ E_{b7} &= P_{c7} \cdot T_2 = 6.014 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} \cdot 1 \cdot 10^{-8} \text{ с} = 6.014 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \\ E_{b8} &= P_{c8} \cdot T_2 = 5.826 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} \cdot 1 \cdot 10^{-8} \text{ с} = 5.826 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \\ E_{b9} &= P_{c9} \cdot T_2 = 5.643 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} \cdot 1 \cdot 10^{-8} \text{ с} = 5.643 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \\ E_{b10} &= P_{c10} \cdot T_2 = 5.467 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} \cdot 1 \cdot 10^{-8} \text{ с} = 5.467 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \end{aligned}$$

Потужність шумів на вході приймача:

$$N_0 = 10^{-19.393} = 4.043 \cdot 10^{-20} \frac{\text{Вт}}{\text{Гц}}$$

Знайдемо відношення сигнал/шум на вході приймача.

$$\frac{E_{b1}}{N_0} = \frac{7.278 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{4.043 \cdot 10^{-20} \text{ Вт} / \text{Гц}} = 18, \quad \frac{E_{b2}}{N_0} = \frac{7.05 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{4.043 \cdot 10^{-20} \text{ Вт} / \text{Гц}} = 17.437.$$

$$\frac{E_{b3}}{N_0} = \frac{6.83 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{4.043 \cdot 10^{-20} \text{ Вт / Гц}} = 16.891.$$

$$\frac{E_{b5}}{N_0} = \frac{6.409 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{4.043 \cdot 10^{-20} \text{ Вт / Гц}} = 15.85.$$

$$\frac{E_{b7}}{N_0} = \frac{6.014 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{4.043 \cdot 10^{-20} \text{ Вт / Гц}} = 14.473.$$

$$\frac{E_{b9}}{N_0} = \frac{5.643 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{4.043 \cdot 10^{-20} \text{ Вт / Гц}} = 13.957.$$

$$\frac{E_{b4}}{N_0} = \frac{6.616 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{4.043 \cdot 10^{-20} \text{ Вт / Гц}} = 16.362.$$

$$\frac{E_{b6}}{N_0} = \frac{6.208 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{4.043 \cdot 10^{-20} \text{ Вт / Гц}} = 15.354.$$

$$\frac{E_{b8}}{N_0} = \frac{5.826 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{4.043 \cdot 10^{-20} \text{ Вт / Гц}} = 14.408.$$

$$\frac{E_{b10}}{N_0} = \frac{5.467 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{4.043 \cdot 10^{-20} \text{ Вт / Гц}} = 13.52.$$

Розрахуємо ймовірність бітової помилки:

$$P_{b1} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 7.278 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(6) = 0.987 \cdot 10^{-9}.$$

$$P_{b2} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 7.05 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.905) = 0.182 \cdot 10^{-8}.$$

$$P_{b3} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 6.83 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.812) = 0.312 \cdot 10^{-8}.$$

$$P_{b4} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 6.616 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.712) = 0.533 \cdot 10^{-8}.$$

$$P_{b5} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 6.409 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.63) = 0.901 \cdot 10^{-8}.$$

$$P_{b6} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 6.208 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.541) = 0.151 \cdot 10^{-7}.$$

$$P_{b7} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 6.014 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.454) = 0.252 \cdot 10^{-7}.$$

$$P_{b8} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 5.826 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.368) = 0.416 \cdot 10^{-7}.$$

$$P_{b9} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 5.643 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.283) = 0.646 \cdot 10^{-7}.$$

$$P_{b10} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 5.467 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.2) = 0.996 \cdot 10^{-7}.$$

Таблиця 3

Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача для швидкості 100 Мбіт/с

Ймовірність бітової помилки, 10^{-8}	0.0987	0.182	0.312	0.533	0.901	1.512	2.518	4.161	6.459	9.964
Потужність сигналу на вході приймача, дБВт	-101.3	-101.5	-101.6	-101.7	-101.9	-102.0	-102.2	-102.3	-102.4	-102.6
Співвідношення сигнал/шум, E_b/N_0	18	17.437	16.891	16.362	15.85	15.354	14.473	14.408	13.957	13.52

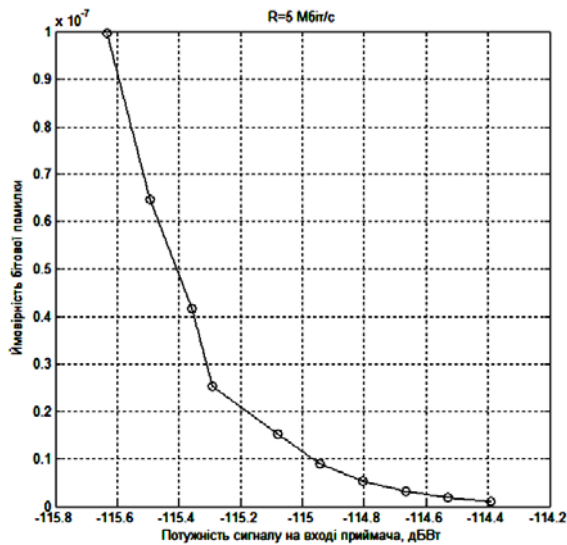


Рис. 2. Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача

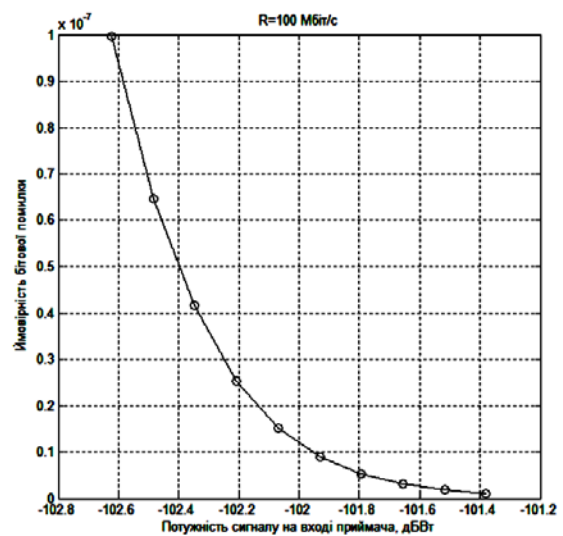


Рис. 3. Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача

У відповідності до даних табл. 3 побудуємо графік залежності значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача (рис. 3).

Для швидкості передачі $R=500$ Мбіт/с визначимо максимально допустиму потужність сигналу ($p_{c,max}$) на вході приймача, яка забезпечує ймовірність бітової помилки 10^{-9} .

Знаходимо Q-функцію [4] для ймовірності помилки 10^{-9} (Q(6)). За формулою (19) знаходимо значення $E_b = 7.278 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Тривалість тактового інтервалу імпульсу дорівнює: $T = 1 / R = 1 / 500 \cdot 10^6 \text{ біт} / \text{с} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ с}$.

За формулами (11) та (13) визначимо $p_{c,max}$:

$$p_{c,max} = \frac{E_b}{T} = \frac{7.278 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{2 \cdot 10^{-9} \text{ с}} = 3.639 \cdot 10^{-10} \text{ Вт} = -94.39 \text{ дБ Вт}.$$

Аналогічно знаходимо значення мінімально допустимої потужності на вході приймача при ймовірності бітової помилки 10^{-7} (Q(5.2)) [4]:

$$p_{c,min} = \frac{E_b}{T} = \frac{5.467 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{2 \cdot 10^{-9} \text{ с}} = 2.733 \cdot 10^{-10} \text{ Вт} = -95.633 \text{ дБ Вт}.$$

Визначимо ймовірність бітових помилок в межах динамічного діапазону потужності сигналу на вході приймача ($p_{c,max} = -94.39$ дБВт; $p_{c,min} = -95.633$ дБВт).

Розрахуємо значення потужностей сигналу на вході приймача:

$$\begin{aligned} P_{c1} &= 10^{0.1 \cdot (-94.39)} = 3.639 \cdot 10^{-10} \text{ Вт}, & P_{c2} &= 10^{0.1 \cdot (-94.528)} = 3.525 \cdot 10^{-10} \text{ Вт}, \\ P_{c3} &= 10^{0.1 \cdot (-94.666)} = 3.415 \cdot 10^{-10} \text{ Вт}, & P_{c4} &= 10^{0.1 \cdot (-94.804)} = 3.308 \cdot 10^{-10} \text{ Вт}, \\ P_{c5} &= 10^{0.1 \cdot (-94.943)} = 3.204 \cdot 10^{-10} \text{ Вт}, & P_{c6} &= 10^{0.1 \cdot (-95.081)} = 3.104 \cdot 10^{-10} \text{ Вт}, \\ P_{c7} &= 10^{0.1 \cdot (-95.219)} = 3.007 \cdot 10^{-10} \text{ Вт}, & P_{c8} &= 10^{0.1 \cdot (-95.357)} = 2.913 \cdot 10^{-10} \text{ Вт}, \\ P_{c9} &= 10^{0.1 \cdot (-95.495)} = 2.822 \cdot 10^{-10} \text{ Вт}, & P_{c10} &= 10^{0.1 \cdot (-95.633)} = 2.733 \cdot 10^{-10} \text{ Вт}, \\ P_{c1} &= P_{c,max} = 3.639 \cdot 10^{-10} \text{ Вт}, & P_{c10} &= P_{c,min} = 2.733 \cdot 10^{-10} \text{ Вт}. \end{aligned}$$

Тривалість одного біта, дорівнює $T_3 = 2 \cdot 10^{-9} \text{ с}$.

Енергія, яка витрачається на передачу одного біта визначається наступним чином:

$$\begin{aligned} E_{b1} &= P_{c1} \cdot T_3 = 3.639 \cdot 10^{-10} \text{ Вт} \cdot 2 \cdot 10^{-9} \text{ с} = 7.278 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}, \\ E_{b2} &= P_{c2} \cdot T_3 = 3.525 \cdot 10^{-10} \text{ Вт} \cdot 2 \cdot 10^{-9} \text{ с} = 7.05 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}, \\ E_{b3} &= P_{c3} \cdot T_3 = 3.415 \cdot 10^{-10} \text{ Вт} \cdot 2 \cdot 10^{-9} \text{ с} = 6.83 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}, \\ E_{b4} &= P_{c4} \cdot T_3 = 3.308 \cdot 10^{-10} \text{ Вт} \cdot 2 \cdot 10^{-9} \text{ с} = 6.616 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}, \\ E_{b5} &= P_{c5} \cdot T_3 = 3.204 \cdot 10^{-10} \text{ Вт} \cdot 2 \cdot 10^{-9} \text{ с} = 6.409 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}, \\ E_{b6} &= P_{c6} \cdot T_3 = 3.104 \cdot 10^{-10} \text{ Вт} \cdot 2 \cdot 10^{-9} \text{ с} = 6.208 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}, \\ E_{b7} &= P_{c7} \cdot T_3 = 3.007 \cdot 10^{-10} \text{ Вт} \cdot 2 \cdot 10^{-9} \text{ с} = 6.014 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}, \\ E_{b8} &= P_{c8} \cdot T_3 = 2.913 \cdot 10^{-10} \text{ Вт} \cdot 2 \cdot 10^{-9} \text{ с} = 5.826 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}, \\ E_{b9} &= P_{c9} \cdot T_3 = 2.822 \cdot 10^{-10} \text{ Вт} \cdot 2 \cdot 10^{-9} \text{ с} = 5.643 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}, \\ E_{b10} &= P_{c10} \cdot T_3 = 2.733 \cdot 10^{-10} \text{ Вт} \cdot 2 \cdot 10^{-9} \text{ с} = 5.467 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}. \end{aligned}$$

Потужність шумів на вході приймача :

$$N_0 = 10^{-19.3933} = 4.043 \cdot 10^{-20} \frac{\text{Вт}}{\text{Гц}}.$$

Знайдемо відношення сигнал/шум на вході приймача:

$$\begin{aligned} \frac{E_{b1}}{N_0} &= \frac{7.278 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{4.043 \cdot 10^{-20} \text{ Вт} / \text{Гц}} = 18, & \frac{E_{b2}}{N_0} &= \frac{7.05 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{4.043 \cdot 10^{-20} \text{ Вт} / \text{Гц}} = 17.437, \\ \frac{E_{b3}}{N_0} &= \frac{6.83 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{4.043 \cdot 10^{-20} \text{ Вт} / \text{Гц}} = 16.891, & \frac{E_{b4}}{N_0} &= \frac{6.616 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{4.043 \cdot 10^{-20} \text{ Вт} / \text{Гц}} = 16.362, \\ \frac{E_{b5}}{N_0} &= \frac{6.409 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{4.043 \cdot 10^{-20} \text{ Вт} / \text{Гц}} = 15.85, & \frac{E_{b6}}{N_0} &= \frac{6.208 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{4.043 \cdot 10^{-20} \text{ Вт} / \text{Гц}} = 15.354, \\ \frac{E_{b7}}{N_0} &= \frac{6.014 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{4.043 \cdot 10^{-20} \text{ Вт} / \text{Гц}} = 14.873, & \frac{E_{b8}}{N_0} &= \frac{5.826 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{4.043 \cdot 10^{-20} \text{ Вт} / \text{Гц}} = 14.408. \end{aligned}$$

$$\frac{E_{b9}}{N_0} = \frac{5.643 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{4.043 \cdot 10^{-20} \text{ Вт / Гц}} = 13.957.$$

$$\frac{E_{b10}}{N_0} = \frac{5.467 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{4.043 \cdot 10^{-20} \text{ Вт / Гц}} = 13.52.$$

Визначимо ймовірність бітової помилки:

$$P_{b1} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 7.278 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(6) = 0.987 \cdot 10^{-9}.$$

$$P_{b2} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 7.05 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.905) = 0.182 \cdot 10^{-8}.$$

$$P_{b3} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 6.83 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.812) = 0.312 \cdot 10^{-8}.$$

$$P_{b4} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 6.616 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.712) = 0.533 \cdot 10^{-8}.$$

$$P_{b5} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 6.409 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.63) = 0.901 \cdot 10^{-8}.$$

$$P_{b6} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 6.208 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.541) = 0.151 \cdot 10^{-7}.$$

$$P_{b7} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 6.014 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.454) = 0.252 \cdot 10^{-7}.$$

$$P_{b8} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 5.826 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.368) = 0.416 \cdot 10^{-7}.$$

$$P_{b9} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 5.643 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.28) = 0.64 \cdot 10^{-7}. \quad P_{b10} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 5.46 \cdot 10^{-19}}{4.043 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.2) = 0.99 \cdot 10^{-7}.$$

Таблиця 4

Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача для швидкості 500 Мбіт/с при $T=293 \text{ К}$

Ймовірність бітової помилки, 10^{-8}	0.0987	0.182	0.312	0.533	0.901	1.512	2.518	4.161	6.459	9.964
Потужність сигналу на вході приймача, дБВт	-94.39	-94.52	-94.66	-94.80	-94.94	-95.08	-95.21	-95.35	-95.49	-95.63
Співвідношення сигнал/шум, E_b/N_0	18	17.43	16.89	16.36	15.85	15.35	14.47	14.40	13.95	13.52

Проведемо аналогічні розрахунки для швидкості передачі $R=500 \text{ Мбіт/с}$ за температури $T=283 \text{ К}$ та $T=308 \text{ К}$, результати яких надані у таблицях 5 та 6.

Таблиця 5

Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача для швидкості 500 Мбіт/с при $T=283 \text{ К}$

Ймовірність бітової помилки, 10^{-8}	0.0987	0.182	0.312	0.533	0.901	1.512	2.518	4.161	6.459	9.964
Потужність сигналу на вході приймача, дБВт	-94,54	-94,679	-94,81	-94,95	-95,09	-95,23	-95,37	-95,50	-95,64	-95,78
Співвідношення сигнал/шум, E_b/N_0	18	17.437	16.891	16.362	15.85	15.354	14.473	14.408	13.957	13.52

Таблиця 6

Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача для швидкості 500 Мбіт/с при $T=308 \text{ К}$

Ймовірність бітової помилки, 10^{-8}	0.0987	0.182	0.312	0.533	0.901	1.512	2.518	4.161	6.459	9.964
Потужність сигналу на вході приймача, дБВт	-94,17	-94,31	-94,44	-94,58	-94,72	-94,84	-95,02	-95,14	-95,27	-95,41
Співвідношення сигнал/шум, E_b/N_0	18	17.43	16.89	16.36	15.85	15.35	14.47	14.40	13.95	13.52

У відповідності до даних табл. 4, 5, 6 побудовано графік залежності значень ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача за заданих температур (рис. 4).

Висновки

1. Мінімальне співвідношення сигнал/шум на вході приймача при модуляції ФМ-2 не повинно бути нижче 6 – 7 дБ. При оптимальному прийманні сигналів з фазовою модуляцією ФМ-2 у каналі без кодування

на вході демодулятора при швидкості коду $R_{код} = 1$ імовірність бітової помилки буде складати $2.4 \cdot 10^{-3}$, а при співвідношенні сигнал/шум 12 дБ імовірність бітової помилки буде складати $9 \cdot 10^{-9}$, що забезпечує високу якість зв'язку.

2. Для забезпечення імовірності бітових помилок в межах від $0.98 \cdot 10^{-7}$ до $0.99 \cdot 10^{-9}$: при швидкості передачі цифрової інформації $R1=5$ Мбіт/с потужність сигналу на вході приймача повинна бути від -114,39 дБ до -115,63 дБ; при $R2=100$ Мбіт/с потужність сигналу на вході приймача повинна бути від -101,38 дБ до -102,62 дБ; при $R3=500$ Мбіт/с потужність сигналу на вході приймача повинна бути від -94,39 дБ до -95,63 дБ.

Таким чином, при збільшенні швидкості передачі цифрової інформації в телекомунікаційних мережах від 5 Мбіт/с до 500 Мбіт/с (у 100 разів) необхідно підвищити потужність сигналу на вході приймача у 100 разів (20 дБ), що забезпечує задану якість зв'язку.

3. Для забезпечення імовірності бітових помилок в межах від $0.98 \cdot 10^{-7}$ до $0.99 \cdot 10^{-9}$: при швидкості передачі цифрової інформації $R3=500$ Мбіт/с: за температури навколишнього середовища $T=283$ К потужність сигналу на вході приймача повинна бути від -94,54 дБ до -95,78 дБ; за температури навколишнього середовища $T=293$ К потужність сигналу на вході приймача повинна бути від -94,39 дБ до -95,63 дБ; за температури навколишнього середовища $T=308$ К потужність сигналу на вході приймача повинна бути від -94,17 дБ до -95,42 дБ.

За швидкості передачі цифрової інформації $R3=500$ Мбіт/с при підвищенні температури навколишнього середовища з 283 К до 308 К (на 25 К) потужність сигналу на вході приймача необхідно підвищити в середньому на 0,37 дБ (у 1,09 разів).

за мінімального співвідношення сигнал/шум 6 дБ

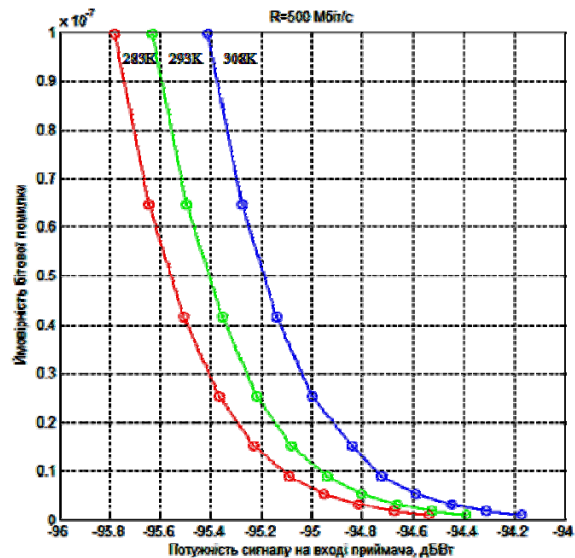


Рис. 4. Залежність значень ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача за заданих температур

Література

1. Банкет В. Л. Завадостійке кодування в телекомунікаційних системах на-вч. посіб. з вивчення модуля 4 дисципліни ТЕЗ / В.Л. Банкет, П.В. Іващенко, М.О. Іщенко. – Одеса : ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2011. – 100 с.
2. Стеклов В.К. Теорія електричного зв'язку / В.К. Стеклов, Л.Н. Беркман ; за ред. В.К. Стеклова. – К. : Техніка, 2006. – 552 с.
3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Скляр Б. ; пер. с англ. – [2-е изд., испр.]. – М. : Изд. дом "Вильямс", 2003. – 1104 с.
4. Сукачев Э.А. Сотовые сети радиосвязи с подвижными объектами : учеб. пособ. / Сукачев Э.А. – [3-е изд., перераб. и дополн.]. – Одесса : ОНАС им. А.С. Попова, 2013. – 256 с.

References

1. Banket V. L. Zavadostiike koduvannia v telekomunikatsiinykh systemakh na-vch. posib. z vyvchennia modulua 4 dystsypliny TEZ / V.L. Banket, P.V. Ivashchenko, M.O. Ishchenko. – Odessa : ONAZ im. O.S. Popova, 2011. – 100 s.
2. Steklov V.K. Teoriia elektrychnoho zviazku / V.K. Steklov, L.N. Berkman ; za red. V.K. Steklova. – K. : Tekhnika, 2006. – 552 s.
3. Sklyar B. Cifrovaya svyaz. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie / Sklyar B. ; per. s angl. – [2-e izd., ispr.]. – M. : Izd. dom "Vilyams", 2003. – 1104 s.
4. Sukachev E.A. Sotovyie seti radiosvyazi s podvizhnyimi obektami : ucheb. posob. / Sukachev E.A. – [3-e izd., pererab. i dopoln.]. – Odessa : ONAS im. A.S. Popova, 2013. – 256 s.

Рецензія/Peer review : 16.6.2019 р.

Надрукована/Printed : 18.7.2019 р.

Рецензент: д.т.н., проф. В.В. Мартинюк