

ДЕРЖАВНИЙ КОМІТЕТ ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ

**Українська державна академія зв'язку
ім. О. С. Попова**

Кафедра теорії електричного зв'язку

**РОЗРАХУНКИ Й ОПТИМІЗАЦІЯ ХАРАКТЕРИСТИК
СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЗВ'ЯЗКУ**

ЗАВДАННЯ
на курсову роботу з дисципліни
“Теорія електричного зв'язку” та
МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до їх виконання

Укладач: доц. Іващенко П. В.

Відп. редактор: доц. Дирда В. Ю.

Одеса 1999

ЗМІСТ

	С.
ПЕРЕДМОВА	3
1 ЗАВДАННЯ НА КУРСОВУ РОБОТУ	4
1.1 Варіант А	4
1.2 Варіант Ц	5
1.3 Варіант Д	7
2 СТРУКТУРНА СХЕМА СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ПОВІДОМЛЕНЬ	8
3 РОЗРАХУНКИ ПАРАМЕТРІВ КОДЕРА І ДЕКОДЕРА ПРОСТОГО КОДУ	9
4 РОЗРАХУНКИ ПАРАМЕТРІВ АЦП ТА ЦАП	11
5 РОЗРАХУНКИ ІНФОРМАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЖЕРЕЛ ПОВІДОМЛЕНЬ ТА ПЕРВИННИХ СИГНАЛІВ	15
5.1 Розрахунки інформаційних характеристик джерела неперервних повідомлень	15
5.2 Розрахунки інформаційних характеристик джерела дискретних повідомлень	16
6 РОЗРАХУНКИ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ДЕМОДУЛЯТОРА	18
6.1 Розрахунки завадостійкості демодулятора сигналу аналогової модуляції	18
6.2 Розрахунки завадостійкості демодулятора сигналу дискретної модуляції	21
7 ВИБІР КОРЕКТУЮЧОГО КОДУ І РОЗРАХУНОК ЗАВАДОСТІЙКОСТІ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ З КОДУВАННЯМ	22
8 РОЗРАХУНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ	28
9 ВИСНОВКИ ДО КУРСОВОЇ РОБОТИ	30
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	30
Додаток 1	31
Додаток 2	33
Додаток 3	35
Додаток 4	37

ПЕРЕДМОВА

Навчальними планами напряму 0924 “Телекомунікації” базової вищої освіти третього та четвертого рівнів акредитації передбачено виконання курсової роботи з дисципліни “Теорія електричного зв'язку”. Мета КР – закріплення знань основних положень курсу “Теорія електричного зв'язку” (ТЕЗ) – досягається шляхом проведення розрахунків характеристик систем електрозв'язку.

Розроблені вказівки є узагальненням досвіду кафедри ТЕЗ з організації та методичного забезпечення виконання курсової роботи. Великий внесок у цю роботу внесли професор Банкет В. Л. і доценти Дирда В. Ю. та Іващенко П. В.

Методичні вказівки містять три варіанти завдань, що відрізняються видами повідомлень і методами їхньої передачі:

Варіант А – система передачі неперервних повідомлень аналоговим методом;

Варіант Ц – система передачі неперервних повідомлень цифровим методом;

Варіант Д – система передачі дискретних повідомлень.

Для виконання КР студент отримує від керівника КР індивідуальне завдання, що вказує номер варіанту (наприклад, “Виконати КР за варіантом Ц-47”). Отримавши завдання в такій формі, студент повинен виписати з розд. 1 цього методичного посібника для відповідного варіанту (у даному випадку “Ц”) перелік вихідних даних, а з відповідного додатку (у даному випадку з Додатку 2, варіант № 47) – числові значення вихідних даних.

У розд. 1 методпосібника для кожного з варіантів наведене “Завдання”, в якому вказані перелік та послідовність розрахунків, що необхідно виконати. Кожен із пунктів завдання повинен бути виконаний як розділ КР. Це “Завдання” керівник КР під час видавання індивідуального завдання може доповнити розділом “Додаткові вимоги”.

У методпосібнику використані умовні позначення, які нині застосовуються в підручниках та на лекціях, практичних і лабораторних заняттях в УДАЗ ім. О.С.Попова.

У Додатку 4 наведені основні правила оформлення КР.

Основною літературою для виконання КР є підручники [1, 2].

1 ЗАВДАННЯ НА КУРСОВУ РОБОТУ

1.1 Варіант А

Повідомлення неперервного джерела передається каналом зв'язку аналого-вим методом. У каналі зв'язку з постійними параметрами й адитивним білим гауссовим шумом використовується модуляція гармонічного переносника.

У табл. Д1 наведені вихідні дані.

- Джерело повідомлень задане характеристиками первинного сигналу $b(t)$:
 - середнє значення дорівнює нулю;
 - густина ймовірності миттєвих значень $p(b)$ – гауссів розподіл (ГР), двосторонній експоненційний розподіл (ДЕР) або рівномірний розподіл на інтервалі $(-b_{\max}, b_{\max})$ (РР);
 - середня потужність сигналу^{*)} P_b ;
 - коефіцієнт амплітуди K_a ;
 - максимальна частота спектра F_{\max} .
- Допустиме відношення сигнал/шум на вході одержувача $\rho_{\text{вих.доп}}$.
- Метод модуляції.
- Для порівняння аналогового і цифрового методів передачі задані:
 - метод передачі – ІКМ з рівномірним квантуванням, допустиме відношення сигнал/шум квантування $\rho_{\text{кв.доп}}$;
 - енергетичний виграш кодування (ЕВК), що забезпечується при використанні в каналі зв'язку завадостійкого кодування;
 - метод дискретної модуляції та спосіб прийому: когерентний або некогерентний.

Завдання

1. **Структурна схема аналогової системи передачі.** Зобразити структурну схему аналогової системи передачі неперервних повідомлень. Пояснити призначення кожного блоку, дати визначення основних параметрів, що характеризують кожний блок, і навести часові діаграми сигналів на входах і виходах блоків.

2. **Розрахунки інформаційних характеристик джерела повідомлень.** Для заданих статистичних характеристик джерела неперервних повідомлень і якості відновлення повідомлення на вході одержувача зробити розрахунки ентронпії $H_\epsilon(B)$, надмірності K і продуктивності джерела R_d . Пояснити причини надмірності джерела. Сформулювати вимоги до пропускнуої здатності каналу зв'язку.

3. **Розрахунок завадостійкості демодулятора.** Для заданого методу модуляції розрахувати і побудувати графік залежності $\rho_{\text{вих}} = f(\rho_{\text{вх}})$. Якщо використовується ЧМ, необхідно вибрати й обґрунтувати індекс модуляції. Визначити необхідне відношення середніх потужностей сигналу і шуму на вході демодуля-

^{*)} У теорії електричного зв'язку середня потужність сигналу визначається як середній квадрат сигналу. Вважаючи, що одиницею виміру сигналу є вольт (В), одиницею виміру потужності буде вольт у квадраті (В²).

тора $\rho_{\text{вх.н}}$, за якого забезпечується задане допустиме відношення сигнал/шум на вході одержувача (на виході демодулятора) $\rho_{\text{вих.доп}}$.

4. Розрахунки основних параметрів цифрової системи передачі. Зобразити структурну схему цифрової системи передачі методом ІКМ з використанням у каналі зв'язку завадостійкого кодування і дискретної модуляції гармонічного переносника. Пояснити призначення кожного блоку та дати визначення основних параметрів, що характеризують кожний блок.

Розрахувати основні параметри АЦП: число рівнів квантування, відношення сигнал/шум квантування для вибраного числа рівнів квантування, допустимої ймовірності помилки символу на вході ЦАП, інтервал дискретизації, тривалість двійкового символу.

Для заданих методу дискретної модуляції та способу прийому розрахувати і побудувати графік залежності ймовірності помилки двійкового символу на виході демодулятора від відношення сигнал/шум на вході демодулятора $p = f(h_0^2)$; визначити необхідне відношення сигнал/шум h_{01}^2 на вході демодулятора, за якого ймовірність помилки символу на виході демодулятора дорівнює допустимій ймовірності помилки символу на вході ЦАП $p_{\text{доп}}$.

Вибрати коректуючий код, що забезпечує заданий енергетичний вигаш кодування для допустимої ймовірності помилки символу на вході ЦАП $p_{\text{доп}}$. Розрахувати і побудувати залежність ймовірності помилки символу на виході декодера від відношення сигнал/шум на вході демодулятора $p_d = f_1(h_0^2)$. Визначити необхідне відношення сигнал/шум на вході демодулятора h_{02}^2 , за якого забезпечується допустима ймовірність помилки символу на вході ЦАП $p_{\text{доп}}$. Визначити одержаний ЕВК.

5. Розрахунки і порівняння ефективності систем передачі неперервних повідомлень. Зробити розрахунки і порівняння інформаційної, енергетичної і частотної ефективностей системи зв'язку, що розраховується, для аналогової передачі і двох варіантів цифрової передачі – без завадостійкого кодування та з ним. Побудувати графік граничної залежності $\beta = f(\gamma)$. На цьому рисунку точками нанести ефективність трьох варіантів передачі. Порівняти показники ефективності трьох варіантів передачі між собою та з граничною ефективністю. Зробити висновки за результатами порівняння.

6. Висновки. Зробити аналіз курсової роботи в цілому.

1.2 Варіант Ц

Повідомлення неперервного джерела передається каналом зв'язку методом ІКМ. У дискретному каналі зв'язку використовується завадостійке кодування. Для передачі неперервним каналом зв'язку з постійними параметрами й адитивним білим гауссовим шумом використовується модуляція гармонічного переносника.

У табл. Д2 наведені вихідні дані.

1. Джерело повідомлень задане характеристиками первинного сигналу $b(t)$:
- середнє значення дорівнює нулю;

- густина ймовірності миттєвих значень $p(b)$ – гауссів розподіл (ГР), двосторонній експоненційний розподіл (ДЕР) або рівномірний розподіл на інтервалі $(-b_{\max}, b_{\max})$ (РР);

- середня потужність сигналу^{*)} P_b ;

- коефіцієнт амплітуди K_a ;

- максимальна частота спектра F_{\max} .

2. Допустиме відношення сигнал/шум на вході одержувача $\rho_{\text{вих.доп}}$.

3. ІКМ перетворення неперервного сигналу в цифровий виконується з використанням рівномірного квантування, допустиме відношення сигнал/шум квантування $\rho_{\text{кв.доп}}$.

4. Метод модуляції гармонічного переносника.

5. Спосіб прийому: когерентний або некогерентний.

6. Енергетичний вииграш кодування (ЕВК).

Завдання

1. **Структурна схема ЦСП.** Зобразити структурну схему цифрової системи передачі неперервних повідомлень. Пояснити призначення кожного блоку, дати визначення основних параметрів, що характеризують кожний блок, і навести часові діаграми сигналів на входах і виходах блоків.

2. **Розрахунки параметрів АЦП і ЦАП.** Скласти і описати структурні схеми АЦП і ЦАП, визначити число рівнів квантування, відношення сигнал/шум квантування при вибраному числі рівнів квантування, допустиму ймовірність помилки символу на вході ЦАП $p_{\text{доп}}$, частоту дискретизації, інтервал дискретизації і тривалість двійкового символу.

3. **Розрахунки інформаційних характеристик джерела повідомлень і переривних сигналів.** Для заданих статистичних характеристик джерела неперервних повідомлень і якості відновлення повідомлення на вході одержувача виконати розрахунки епсилон-ентропії $H_\epsilon(B)$, надмірності k і продуктивності джерела R_d . Пояснити причини надмірності джерела. Сформулювати вимоги до пропускної здатності каналу зв'язку.

4. **Розрахунок завадостійкості демодулятора.** Для заданих методу модуляції і способу прийому розрахувати і побудувати графік залежності ймовірності помилки двійкового символу на виході демодулятора від відношення сигнал/шум на вході демодулятора $p = f(h_0^2)$; визначити необхідне відношення сигнал/шум на вході демодулятора h_{01}^2 , за якого ймовірність помилки символу на виході демодулятора дорівнює допустимій ймовірності помилки символу на вході ЦАП $p_{\text{доп}}$.

5. **Вибір коректуючого коду та розрахунок завадостійкості системи зв'язку з кодуванням.** Для заданих методу модуляції і способу прийому вибрати коректуючий код, що забезпечує заданий енергетичний вииграш кодування для ймовірності помилки символу на виході декодера $p_d = p_{\text{доп}}$. Розрахувати і побудувати залежність ймовірності помилки символу на виході декодера від відношення

^{*)} Дивись виноску на с. 4.

сигнал/шум на вході демодулятора $p_d = f_1(h_6^2)$. Визначити необхідне відношення сигнал/шум на вході демодулятора h_{62}^2 , за якого забезпечується ймовірність помилки символу на виході декодера $p_{\text{доп}}$. Визначити одержаний ЕВК.

6. Розрахунки основних параметрів аналогової системи передачі. Зобразити структурну схему аналогової системи передачі методом ЧМ. Пояснити призначення кожного блоку і дати визначення основних параметрів, що характеризують кожний блок.

Характеристики повідомлення, що передається, допустиме відношення сигнал/шум $\rho_{\text{вих.доп}}$ і смуга пропускання неперервного каналу зв'язку ті ж, що і в системі цифрової передачі із завадостійким кодуванням. З метою порівняння аналогового і цифрового методів передачі визначити необхідне відношення сигнал/шум на вході демодулятора $\rho_{\text{вх.н}}$. Індекс модуляції визначити за двох умов: обмеженої смуги частот каналу зв'язку та роботи демодулятора вище порога.

7. Розрахунки і порівняння ефективності систем передачі неперервних повідомлень. Виконати розрахунки і порівняння інформаційної, енергетичної і частотної ефективностей системи зв'язку для двох варіантів цифрової передачі – без завадостійкого кодування і з ним та аналогової передачі методом ЧМ. Побудувати графік граничної залежності $\beta = f(\gamma)$. На цьому рисунку точками нанести ефективність трьох варіантів передачі. Порівняти показники ефективності трьох варіантів передачі між собою і з граничною ефективністю. Зробити висновки за результатами порівняння.

8. Висновки. Зробити аналіз курсової роботи в цілому.

1.3 Варіант Д

Повідомлення дискретного джерела кодується двійковим кодом і передається дискретним каналом зв'язку з завадостійким кодуванням. Для передачі неперервним каналом зв'язку з постійними параметрами й адитивним білим гауссовим шумом використовується модуляція гармонічного переносника.

У табл. Д3 наведені вихідні дані:

1. Джерело виробляє послідовність незалежних знаків з розподілом імовірностей: або рівноймовірним для обсягу алфавіту M_a , або з розподілом літер українського тексту, або з розподілом літер російського тексту, або з розподілом літер англійського тексту.

2. Допустима ймовірність помилки знака на вході одержувача $P_{\text{зн.доп}}$.

3. Швидкість модуляції на виході кодера простого коду B .

4. Метод модуляції.

5. Спосіб прийому: когерентний або некогерентний.

6. Енергетичний виграш кодування (ЕВК).

Завдання

1. **Структурна схема СПДП.** Зобразити структурну схему системи передачі дискретних повідомлень. Пояснити призначення кожного блоку, дати визначення основних параметрів, що характеризують кожний блок, і навести часові діаграми сигналів на входах і виходах блоків.

2. **Розрахунки параметрів кодера і декодера простого коду.** Розрахувати параметри кодера і декодера простого коду: довжину коду n , тривалість двійкового символу T_6 , тривалість передачі одного знака T_{zn} , допустиму ймовірність помилки символу на вході декодера $p_{доп}$.

3. **Розрахунки інформаційних характеристик джерела повідомлень.** Для заданих статистичних характеристик джерела дискретних повідомлень виконати розрахунки ентропії $H(A)$, надмірності K і продуктивності джерела R_d . Пояснити причини надмірності джерела. Сформулювати вимоги до пропускну здатності каналу зв'язку.

4. **Розрахунок завадостійкості демодулятора.** Для заданих методу модуляції і способу прийому розрахувати і побудувати графік залежності ймовірності помилки двійкового символу на виході демодулятора від відношення сигнал/шум на вході демодулятора $p = f(h_6^2)$; визначити необхідне відношення сигнал/шум на вході демодулятора h_{61}^2 , за якого ймовірність помилки символу на виході демодулятора дорівнює допустимій ймовірності помилки символу на вході декодера простого коду $p_{доп}$.

5. **Вибір коректуючого коду і розрахунок завадостійкості системи зв'язку з кодуванням.** Для заданих методу модуляції та способу прийому вибрати коректуючий код, що забезпечує заданий енергетичний виграш кодування для ймовірності помилки символу на виході декодера $p_d = p_{доп}$. Розрахувати і побудувати залежність ймовірності помилки символу на виході декодера від відношення сигнал/шум на вході демодулятора $p_d = f_1(h_6^2)$. Визначити необхідне відношення сигнал/шум на вході демодулятора h_{62}^2 , за якого забезпечується допустима ймовірність помилки символу на виході декодера $p_{доп}$. Визначити досягнутий ЕВК.

6. **Розрахунки ефективності системи передачі дискретних повідомлень.** Виконати розрахунки і порівняння інформаційної, енергетичної і частотної ефективностей системи зв'язку, що розраховується, для двох варіантів передачі – без завадостійкого кодування і з ним. Побудувати графік граничної залежності $\beta = f(\gamma)$. На цьому рисунку точками нанести ефективність двох варіантів передачі. Порівняти ефективність двох варіантів передачі між собою і з граничною ефективністю. Зробити висновки за результатами порівняння.

7. **Висновки.** Зробити аналіз курсової роботи в цілому.

2 СТРУКТУРНА СХЕМА СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ПОВІДОМЛЕНЬ

У цьому розділі КР необхідно навести опис структурної схеми системи електров'язку, принципу дії і особливостей роботи окремих блоків для заданого виду повідомлення і способу передачі (кодування і модуляції). Під час опису необхідно дати визначення основних параметрів, що характеризують кожний блок, і навести часові діаграми сигналів на входах і виходах блоків.

Під час розглядання систем передачі неперервних повідомлень вважають, що первинний сигнал $b(t)$ пропорційний повідомленню $a(t)$: $b(t) = c \cdot a(t)$, c – кое-

фіцієнт пропорційності. Тому повідомлення на виході джерела і вході одержувача представлені первинними сигналами $b(t)$ і $\hat{b}(t)$ відповідно.

Структурна схема системи передачі неперервних повідомлень аналоговим методом наведена на рис. 1, а. Для її опису можна скористатись матеріалом розділу 1 підручників [1, 2].

Структурна схема цифрової системи передачі неперервних повідомлень наведена на рис. 1, б. Для її опису див. [1, розд. 1 та 8.1; 2, розд. 1 та 16.1]. Оскільки в системі передачі використовується завадостійке кодування, то між АЦП і модулятором увімкнений кодер коректуючого коду, а між демодулятором і ЦАП – декодер коректуючого коду.

Структурна схема системи передачі дискретних повідомлень наведена на рис. 1, в. Для її опису див. [1, розд. 1; 2, розд. 1 та 18.2]. Оскільки за завданням обсяг алфавіту джерела повідомлень $M_a > 2$, а в каналі зв'язку використовується завадостійке кодування, то схема містить два кодери – простого і коректуючого кодів і, відповідно, два декодери – коректуючого і простого кодів.

3 РОЗРАХУНКИ ПАРАМЕТРІВ КОДЕРА І ДЕКОДЕРА ПРОСТОГО КОДУ

Вихідні дані:

- обсяг алфавіту джерела дискретних повідомлень M_a ;
- швидкість модуляції на виході кодера простого коду B ;
- допустима ймовірність помилки знаку на виході декодера $P_{\text{зн.доп}}$.

Вимагається визначити:

- тривалість двійкового символу (біта^{*)}) на виході кодера T_6 ;
- довжину простого коду n ;
- тривалість передачі одного знака $T_{\text{зн}}$;
- допустиму ймовірність помилки двійкового символу на вході декодера

$P_{\text{доп}}$.

Розрахункові співвідношення й порядок розрахунків

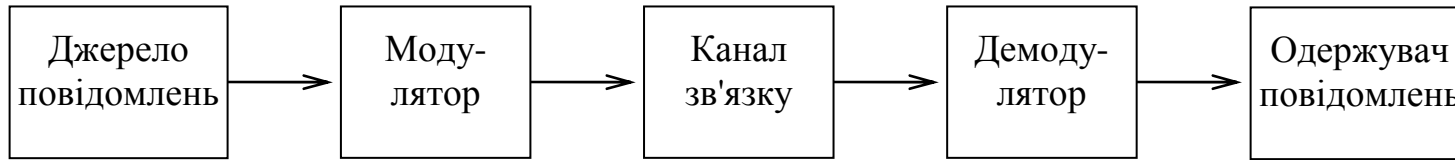
Припускається, що кодування ведеться рівномірним кодом, для якого, на відміну від нерівномірного коду, більш прості в реалізації кодер та декодер.

Довжина коду визначається за умови, що число можливих кодових комбінацій не менше за обсяг алфавіту джерела:

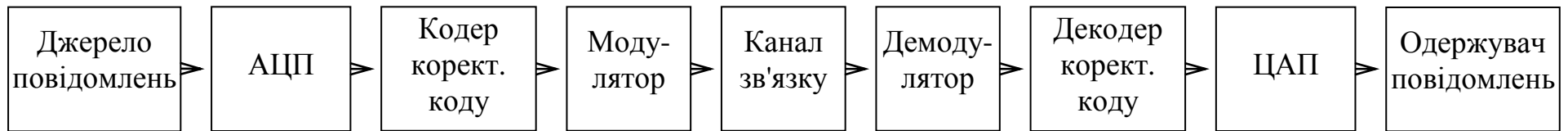
$$2^n \geq M_a \text{ або } n \geq \log_2 M_a. \quad (3.1)$$

Оскільки інші вимоги до коду не пред'являються, то довжина коду вибирається як мінімальне ціле число, за якого виконуються нерівності (3.1).

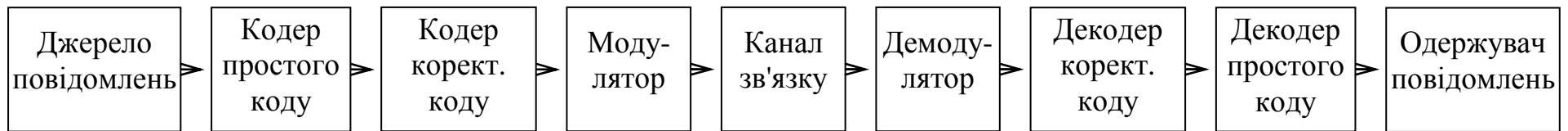
^{*)} У техніці зв'язку й обчислювальній техніці двійкові символи, які відображають повідомлення і підлягають передачі каналами зв'язку або зберіганню в запам'ятовуючих пристроях, називають бітами, не пов'язуючи це з кількістю інформації в символі (у теорії інформації біт – одиниця кількості інформації). Тому числові параметри, які відносяться до цих двійкових символів, мають нижній індекс "б": T_b, E_b, h_b, p_b тощо.



a)



б)



в)

Рисунок 1 – Структурні схеми систем передачі: *a* – неперервних повідомлень аналоговим методом; *б* – неперервних повідомлень цифровим методом; *в* – дискретних повідомлень

Тривалість двійкового символу на виході кодера

$$T_{\text{с}} = 1/B. \quad (3.2)$$

Тривалість передачі одного знака

$$T_{\text{зн}} = nT_{\text{с}}. \quad (3.3)$$

Допустима ймовірність помилки двійкового символу на вході декодера визначається за умови, що помилки символів у каналі зв'язку (вихід кодера – вхід декодера) незалежні: $P_{\text{зн.доп}} = 1 - (1 - p_{\text{доп}})^n = 1 - (1 - np_{\text{доп}} + 0,5n(n-1)p_{\text{доп}}^2 - \dots)$. Ясно, що при заданих малих значеннях $P_{\text{зн.доп}} \leq 10^{-4}$ величина $P_{\text{зн.доп}}$ буде визначатись складовим $np_{\text{доп}}$, тобто

$$p_{\text{доп}} \approx P_{\text{зн.доп}}/n. \quad (3.4)$$

4 РОЗРАХУНКИ ПАРАМЕТРІВ АЦП ТА ЦАП

Вихідні дані для розрахунків:

- максимальна частота спектра первинного сигналу F_{max} ;
- густина ймовірності миттєвих значень первинного сигналу $p(b)$;
- середня потужність первинного сигналу P_b ;
- коефіцієнт амплітуди первинного сигналу K_a ;
- допустиме відношення сигнал/шум на вході одержувача $\rho_{\text{вих.доп}}$;
- допустиме відношення сигнал/шум квантування $\rho_{\text{кв.доп}}$;
- в АЦП застосовано рівномірне квантування.

Вимагається:

- скласти і описати структурні схеми АЦП і ЦАП;
- визначити частоту дискретизації f_d і інтервал дискретизації T_d ;
- визначити число рівнів квантування L , довжину двійкового коду n і тривалість двійкового символу $T_{\text{с}}$;
- розрахувати відношення сигнал/шум квантування $\rho_{\text{кв}}$ для розрахованих параметрів АЦП;
- розрахувати допустиму ймовірність помилки символу $p_{\text{доп}}$ в каналі зв'язку (на вході ЦАП).

Розрахункові формули

Згідно з теоремою Котельникова [1, розд. 2.7; 2, розд. 2.4] частота дискретизації $f_d = 1/T_d$ повинна задовольняти умові

$$f_d \geq 2F_{\text{max}}. \quad (4.1)$$

Інтервал дискретизації – величина, обернена частоті дискретизації

$$T_d = 1 / f_d. \quad (4.2)$$

Завадостійкість системи передачі неперервних повідомлень визначається відношенням сигнал/шум на вході одержувача

$$\rho_{\text{вих}} = P_b / \sigma_\varepsilon^2, \quad (4.3)$$

де σ_ε^2 – середня потужність завади на вході одержувача.

У системі цифрової передачі методом ІКМ потужність шуму на виході ЦАП визначається

$$\sigma_\varepsilon^2 = \overline{\varepsilon_{\text{кв}}^2} + \overline{\varepsilon_{\text{х.і}}^2}, \quad (4.4)$$

де $\overline{\varepsilon_{\text{кв}}^2}$ – середня потужність шуму квантування;

$\overline{\varepsilon_{\text{х.і}}^2}$ – середня потужність шуму хибних імпульсів.

У системі передачі методом ІКМ визначають також відношення сигнал/шум квантування

$$\rho_{\text{кв}} = P_b / \overline{\varepsilon_{\text{кв}}^2}. \quad (4.5)$$

Величина $\rho_{\text{кв}}$ при рівномірному квантуванні визначається

$$\rho_{\text{кв}} = 3L^2 / K_a^2. \quad (4.6)$$

Потужність шуму хибних імпульсів на виході ЦАП визначається співвідношенням [1, формула (8.14)]

$$\overline{\varepsilon_{\text{х.і}}^2} = p(\Delta b)^2 \sum_{i=1}^n 2^{2(i-1)} = p(\Delta b)^2 \frac{4^n - 1}{3}, \quad (4.7)$$

де p – імовірність помилки двійкового символу на вході ЦАП;

Δb – крок квантування;

n – довжина двійкового коду АЦП, яка пов'язана з числом рівнів квантування

$$n = \log_2 L. \quad (4.8)$$

Це співвідношення враховує, що число рівнів квантування L – цілий степінь числа два.

Оскільки первинний сигнал $b(t)$, що підлягає перетворенню в цифровий, приймає значення від b_{min} до b_{max} , то підлягає квантуванню інтервал $(b_{\text{min}}, b_{\text{max}})$, і крок квантування визначається

$$\Delta b = (b_{\max} - b_{\min}) / L. \quad (4.9)$$

У сигналів із середнім значенням, що дорівнює нулю, $b_{\min} = -b_{\max}$. Якщо значення b_{\max} не задане, то воно визначається як

$$b_{\max} = K_a \sqrt{P_b}. \quad (4.10)$$

Тривалість двійкового символу на виході АЦП визначається

$$T_6 = T_d / n. \quad (4.11)$$

Порядок розрахунків

Структурні схеми АЦП і ЦАП докладно описані в [1, розд. 8; 2, розд. 16]. Наведені там схеми АЦП необхідно доповнити вхідним ФНЧ, що в реальних системах електрозв'язку використовується для обмеження спектра первинного сигналу. Це пов'язане з тим, що в більшості первинних сигналів спектр є поволі спадаючою функцією, і величина F_{\max} не є частотою, вище якої спектр дорівнює нулю, а є граничною частотою смуги, яку необхідно передати за умови досягнення заданої якості відновлення первинного сигналу (F_{\max} визначається необхідною розбірливістю мови, чіткістю зображення тощо).

Збільшення частоти дискретизації дозволяє спростити вхідний фільтр АЦП, що обмежує спектр первинного сигналу, і вихідний (інтерполюючий) ФНЧ ЦАП, що відновлює неперервний сигнал за відліками. Але збільшення частоти дискретизації призводить до зменшення тривалості двійкових символів на виході АЦП, що вимагає небажаного розширення смуги частот каналу зв'язку для передачі цих символів. Звичайно параметри вхідного ФНЧ АЦП і вихідного ФНЧ ЦАП вибирають однаковими.

На рис. 2 дані: $S(f)$ – спектр відліків, поданих вузькими імпульсами, $S_b(f)$ – спектр неперервного сигналу $b(t)$, $A(f)$ – робоче ослаблення ФНЧ. Для того, щоб ФНЧ не вносили лінійних спотворень у неперервний сигнал, граничні частоти смуг пропускання ФНЧ повинні задовольняти умові

$$f_1 \geq F_{\max}. \quad (4.12)$$

Для того, щоб виключити накладення спектрів $S_b(f)$ і $S_b(f - f_d)$, а також забезпечити ослаблення відновлюючим ФНЧ складових $S_b(f - f_d)$, граничні частоти смуг затримки ФНЧ повинні задовольняти умові

$$f_2 \leq (f_d - F_{\max}). \quad (4.13)$$

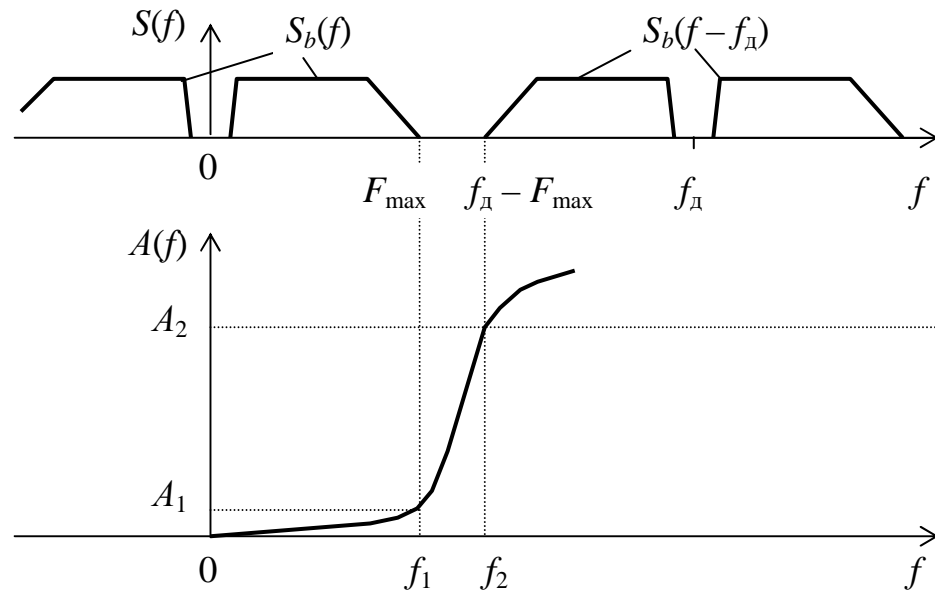


Рисунок 2 – Спектр відліків та АЧХ фільтрів АЦП і ЦАП

Щоб ФНЧ не були занадто складними, відношення граничних частот вибирають з умови

$$f_2 / f_1 = 1,3 - 1,4. \quad (4.14)$$

Після підстановки співвідношень (4.12) і (4.13) у формулу (4.14) можна вибрати частоту дискретизації, а після цього розрахувати інтервал дискретизації.

Для визначення числа рівнів квантування слід за формулою (4.6) за заданим допустимим відношенням сигнал/шум квантування $\rho_{\text{кв.доп}}$ розрахувати допустиме число рівнів квантування $L_{\text{доп}}$, а після цього вибрати $L \geq L_{\text{доп}}$ і розрахувати n за формулою (4.8).

Під час проведення розрахунків задані в децибелах відношення сигнал/шум необхідно перевести в рази

$$\rho = 10^{0,1\rho \text{ [дБ]}}. \quad (4.15)$$

За формулою (4.6) слід розрахувати значення $\rho_{\text{кв}}$ за вибраними параметрами АЦП, перевести розраховане значення в децибелі і порівняти із заданим $\rho_{\text{кв.доп}}$.

Допустима ймовірність помилки двійкового символу на вході ЦАП $p_{\text{доп}}$ визначається за співвідношенням (4.7). Для обчислення $p_{\text{доп}}$ необхідно заздалегідь визначити допустиму величину потужності шуму хибних імпульсів за формулами (4.3), (4.4) і (4.5), прийнявши $\rho_{\text{вих}} = \rho_{\text{вих.доп}}$, а також величину кроку квантування, що визначається формулою (4.9).

5 РОЗРАХУНКИ ІНФОРМАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЖЕРЕЛ ПОВІДОМЛЕНЬ І ПЕРВИННИХ СИГНАЛІВ

5.1 Розрахунки інформаційних характеристик джерела неперервних повідомлень

Вихідні дані:

- густина ймовірності миттєвих значень первинного сигналу $p(b)$;
- максимальна частота спектра первинного сигналу F_{\max} ;
- відношення середньої потужності первинного сигналу до середньої потужності помилки відновлення на виході системи передачі $\rho_{\text{вих.доп}}$.

Вимагається розрахувати:

- епсилон-ентропію джерела $H_\epsilon(B)$;
- коефіцієнт надмірності джерела K ;
- продуктивність джерела R_d .

Розрахункові формули і порядок розрахунків

Повідомлення неперервного джерела перетворюється в первинний аналоговий сигнал $b(t)$ звичайно без втрат інформації, тому розрахунки інформаційних характеристик джерела провадяться для первинного сигналу.

Відомості про епсилон-ентропію і методи її розрахунку наведені в [1, розд. 4.7] – формула (4.63). Диференціальна ентропія $h(B)$ та умовна диференціальна ентропія $h(B/\hat{B})$, що входять у формулу (4.63), обчислюються за співвідношенням (4.30) у [1] за відомими густинами ймовірності сигналів $b(t)$ і $\hat{b}(t)$. Диференціальна ентропія сигналу залежить від розподілу ймовірності $p(b)$ та дисперсії сигналу σ_b^2 , і відповідні розрахункові формули для її обчислення наведені в табл. 1. У сигналів із середнім значенням, що дорівнює нулю, $\sigma_b^2 = P_b$.

Таблиця 1 – Розрахункові формули для диференціальної ентропії

Розподіл імовірності	Диференціальна ентропія $h(B)$, біт/відлік
Гауссів розподіл (крива 1 на рис. 3) $p(b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_b} \exp\left(-\frac{b^2}{2\sigma_b^2}\right)$	$\log_2(\sigma_b \sqrt{2\pi e})$
Двосторонній експоненційний розподіл (крива 2 на рис. 3) $p(b) = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_b} \exp\left(-\frac{\sqrt{2} b }{\sigma_b}\right)$	$\log_2(\sigma_b e \sqrt{2})$
Рівномірний розподіл (крива 3 на рис. 3) $p(b) = \begin{cases} 0,5 / b_{\max}, & b \leq b_{\max} \\ 0, & b > b_{\max} \end{cases}$	$\log_2(\sigma_b 2\sqrt{3})$

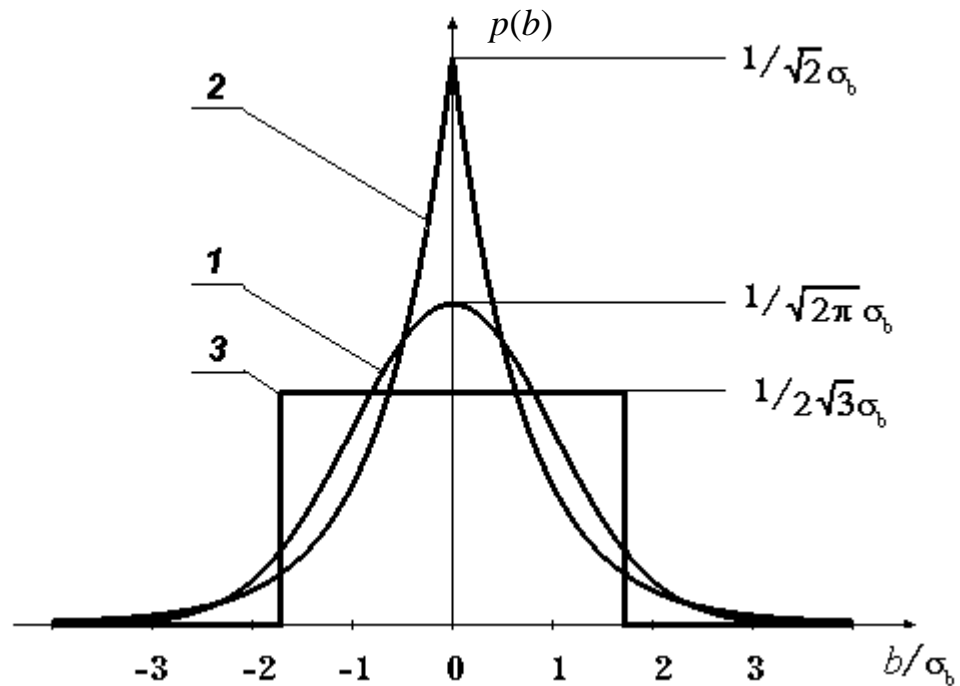


Рисунок 3 – Розподіли ймовірностей первинних сигналів

Під час розрахунків вважають, що помилка відновлення на виході системи передачі є гауссовою, і умовна диференціальна ентропія $h(B/\hat{B})$ обчислюється за формулою (4.34) у [1], в яку необхідно підставити значення дисперсії помилки відновлення (потужності завади на виході системи передачі) σ_ε^2 . Значення σ_ε^2 визначається за заданим відношенням сигнал/шум $\rho_{\text{вих}}$ і середній потужності сигналу P_b за формулою (4.3). До обчислень усі задані в децибелах величини необхідно перевести в рази – формула (4.15).

Коефіцієнт надмірності джерела K обчислюється за формулою (4.10) з [1]. У цю формулу підставляються обчислене значення епсилон-ентропії $H_\varepsilon(B)$ і максимально можливе значення $H_{\varepsilon \max}(B)$, що досягається для гауссового розподілу ймовірності сигналу $b(t)$ з тією ж дисперсією сигналу σ_b^2 .

Продуктивність джерела $R_d = H'_\varepsilon(B)$, яку називають епсилон-продуктивністю, обчислюють у припущенні, що відліки слідує через інтервал Котельникова – формула (4.67) з [1]. У цій формулі F_c – максимальна частота спектра первинного сигналу F_{\max} . Вимоги до пропускної здатності неперервного каналу зв'язку формулюються на основі теореми кодування Шеннона для каналу із завадами [1, розд. 4.6].

5.2 Розрахунки інформаційних характеристик джерела дискретних повідомлень

Вихідні дані:

- обсяг алфавіту джерела M_a ;

- імовірності знаків $P(a_k)$, що утворюють алфавіт джерела (припускається, що знаки в повідомленнях незалежні);

- тривалість передачі одного знака $T_{\text{зн}}$.

Вимагається розрахувати:

- ентропію джерела $H(A)$;

- коефіцієнт надмірності джерела K ;

- продуктивність джерела R_d .

Розрахункові формули і порядок розрахунку

Розрахунки інформаційних характеристик можна виконати на основі матеріалу, викладеного в розд. 4.1 підручника [1]. Необхідні для розрахунків імовірності літер в українському, російському і англійському текстах наведені в табл. 2, 3 і 4. Розрахунки ентропії джерела слід виконувати на ЕОМ або програмованому калькуляторі.

Продуктивність джерела R_d легко визначити, якщо знати ентропію і тривалість передачі одного знака [1, формула (4.11)].

Вимоги до пропускну здатності дискретного каналу зв'язку формулюються на основі теореми кодування Шеннона для каналу із завадами [1, розд. 4.6].

Таблиця 2 – Розподіл імовірностей літер в українських текстах

Літера	Імовірність	Літера	Імовірність	Літера	Імовірність	Літера	Імовірність
Пропуск	0,122	Р	0,040	З	0,018	Ж	0,007
О	0,090	С	0,034	Й	0,017	Ц	0,006
А	0,074	Л	0,034	Б	0,016	Ю	0,006
И	0,059	К	0,032	Я	0,015	Ї	0,006
І	0,055	У	0,032	Г	0,013	Є	0,003
Н	0,053	Д	0,026	Ч	0,012	Ф	0,002
В	0,047	П	0,026	Ш	0,010		
Т	0,044	М	0,023	Х	0,008		
Е	0,041	Ь	0,021	Щ	0,008		

Таблиця 3 – Розподіл імовірностей літер у російських текстах

Літера	Імовірність	Літера	Імовірність	Літера	Імовірність	Літера	Імовірність
Пропуск	0,175	Р	0,040	Я	0,018	Х	0,009
О	0,089	В	0,038	Ы	0,016	Ж	0,007
Е, Ё	0,072	Л	0,035	З	0,016	Ю	0,006
А	0,062	К	0,028	Ь, Ь	0,014	Ш	0,006
И	0,062	М	0,026	Б	0,014	Ц	0,004
Т	0,053	Д	0,025	Г	0,013	Щ	0,003
Н	0,053	П	0,023	Ч	0,012	Э	0,003
З	0,045	У	0,021	Й	0,010	Ф	0,002

Таблиця 4 – Розподіл імовірностей літер в англійських текстах

Літера	Імовірність	Літера	Імовірність	Літера	Імовірність	Літера	Імовірність
Пропуск	0,198	R	0,054	U	0,022	V	0,008
E	0,105	S	0,052	M	0,021	K	0,003
T	0,072	H	0,047	P	0,017	X	0,002
O	0,065	D	0,035	Y	0,012	J	0,001
A	0,063	L	0,029	W	0,012	Q	0,001
N	0,059	C	0,023	G	0,011	Z	0,001
I	0,055	F	0,022	B	0,010		

6 РОЗРАХУНКИ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ДЕМОДУЛЯТОРА

6.1 Розрахунки завадостійкості демодулятора сигналу аналогової модуляції

Вихідні дані:

- допустиме відношення сигнал/шум на виході демодулятора $\rho_{\text{вих.доп}}$;
- метод модуляції;
- канал зв'язку – з постійними параметрами й адитивним білим гауссовим шумом;
- параметри первинного сигналу – коефіцієнт амплітуди K_a і максимальна частота спектра $F_{\text{мах}}$.

Вимагається розрахувати:

- залежність $\rho_{\text{вих}} = f(\rho_{\text{вх}})$;
- необхідне відношення середніх потужностей сигналу і шуму на вході демодулятора $\rho_{\text{вх.н}}$.

Розрахункові співвідношення та порядок розрахунку

Основною характеристикою демодулятора сигналу аналогової модуляції є залежність $\rho_{\text{вих}} = f(\rho_{\text{вх}})$, яка встановлює зв'язок між відношенням середніх потужностей сигналу і шуму на вході демодулятора $\rho_{\text{вх}} = P_s / P_n$ і відношенням середніх потужностей сигналу і шуму на виході демодулятора $\rho_{\text{вих}} = P_b / P_e$. Відношення $\rho_{\text{вих}}$ і $\rho_{\text{вх}}$ надає виграш демодулятора g [1, формула (7.32)]:

$$\rho_{\text{вих}} = g \rho_{\text{вх}} \quad (6.1)$$

(тут і нижче в формулах $\rho_{\text{вих}}$ і $\rho_{\text{вх}}$ виражаються в разях).

Для сигналів АМ, БМ і ОМ величина g не залежить від $\rho_{\text{вх}}$ і визначається формулами, наведеними в [1, с. 220]. Для заданого виду модуляції – ОМ, БМ або АМ визначте виграш g (коефіцієнт амплітудної модуляції $m_{\text{АМ}}$ підлягає вибору і обґрунтуванню за умови, що $m_{\text{АМ}} \leq 1$). Побудуйте графік залежності $\rho_{\text{вих}} = f(\rho_{\text{вх}})$ для діапазону значень $\rho_{\text{вих}}$ від 0 дБ до допустимого значення $\rho_{\text{вих.доп}}$. Масштаб для $\rho_{\text{вих}}$ і $\rho_{\text{вх}}$ повинен бути логарифмічним, як на рис. 7.5 в [1]. Визначте необхідне

відношення $\rho_{\text{вх.н}}$; покажіть на графіку точку, відповідну допустимому $\rho_{\text{вих.доп}}$ і необхідному $\rho_{\text{вх.н}}$.

При частотній модуляції виграш демодулятора залежить від $\rho_{\text{вх}}$ і визначається

$$g_{\text{ЧМ}} = \frac{3m_{\text{ЧМ}}^2 \cdot \alpha_{\text{ЧМ}}}{K_a^2} \cdot \frac{1}{1 + 4m_{\text{ЧМ}}^2 \exp(-\rho_{\text{вх}}) \sqrt{3\rho_{\text{вх}} (1 + 6\rho_{\text{вх}} / K_a^2) / \pi}}, \quad (6.2)$$

де $m_{\text{ЧМ}}$ – індекс частотної модуляції;

$$\alpha_{\text{ЧМ}} = F_S / F_{\text{max}} = 2(m_{\text{ЧМ}} + 1) \quad (6.3)$$

– коефіцієнт розширення смуги частот при ЧМ;

$$F_S = 2 F_{\text{max}} (m_{\text{ЧМ}} + 1) \quad (6.4)$$

– ширина спектра ЧМ сигналу.

Другий співмножник у формулі (6.2) близький до 1, коли $\rho_{\text{вх}}$ перевищує порогове відношення сигнал/шум $\rho_{\text{пор}}$ [1, розд. 7.5]. У цьому випадку виграш демодулятора визначається [1, формула (7.42)]:

$$g_{\text{ЧМ}} = \frac{3m_{\text{ЧМ}}^2}{K_a^2} \alpha_{\text{ЧМ}}. \quad (6.5)$$

Порогове відношення сигнал/шум складно залежить від $m_{\text{ЧМ}}$ і K_a . Для визначення значення $\rho_{\text{пор}}$ за заданими $m_{\text{ЧМ}}$ і K_a розраховують залежність $\rho_{\text{вих}} = g_{\text{ЧМ}} \rho_{\text{вх}}$, коли $g_{\text{ЧМ}}$ визначається формулою (6.2). Приклад такої залежності наведений на рис. 4 – значення $\rho_{\text{вих}}$ і $\rho_{\text{вх}}$ представлені в децибелах. Значення $\rho_{\text{пор}}$ відповідає такому значенню $\rho_{\text{вх}}$, нижче якого зменшення $\rho_{\text{вх}}$ призводить до різкого зменшення $\rho_{\text{вих}}$. Режим роботи демодулятора, коли $\rho_{\text{вх}} < \rho_{\text{пор}}$, не є робочим. Орієнтовне значення $\rho_{\text{пор}}$ дорівнює 10 дБ.

Оптимізація аналогової системи передачі методом ЧМ полягає у виборі індексу модуляції $m_{\text{ЧМ}}$, за якого мінімізується значення $\rho_{\text{вх}}$. Методика вибору індексу модуляції залежить від того, задана чи не задана смуга частот використовуваного каналу зв'язку.

1. Смуга частот каналу зв'язку F_k обмежена: у завданні на КР за варіантом Ц обумовлено, що смуга частот каналу зв'язку для передачі повідомлення аналогової ЧМ не повинна перевищувати смугу частот каналу зв'язку цифрової системи передачі з завадостійким кодуванням F_k . Ця смуга частот визначається формулами (8.1), (8.2). У такому випадку індекс модуляції $m_{\text{ЧМ}}$ визначається за умови обмеженої смуги частот каналу зв'язку

$$F_S \leq F_k \quad (6.6)$$

і умови роботи демодулятора вище порога $\rho_{\text{вх}} \geq \rho_{\text{пор}}$. Після підстановки значення F_S із формули (6.4) у вираз (6.6) визначається індекс $m_{\text{ЧМ1}}$, що задовольняє умові обмеженої смуги частот каналу зв'язку.

Для задоволення умови роботи вище порога слід прийняти значення $\rho_{\text{вх}} \geq \rho_{\text{пор}}$. Вважаючи, що $\rho_{\text{вх}} = \rho_{\text{пор}} = 10$, $\alpha_{\text{ЧМ}} \approx 2 m_{\text{ЧМ}}$ та, використовуючи співвідношення (6.1) і (6.5), можна визначити орієнтовне значення $m_{\text{ЧМ2}}$, за якого демодулятор буде працювати в області порога:

$$m_{\text{ЧМ2}} = \sqrt[3]{\rho_{\text{вих.доп}} K_a^2 / 60}. \quad (6.7)$$

Остаточно вибирають $m_{\text{ЧМ}}$, як менший з двох значень $m_{\text{ЧМ1}}$ і $m_{\text{ЧМ2}}$. Для вибраного значення $m_{\text{ЧМ}}$ будують графік $\rho_{\text{вих}} = f(\rho_{\text{вх}})$ – формула (6.2). На цьому графіку вказують точку, відповідну заданому $\rho_{\text{вих.доп}}$ і необхідному $\rho_{\text{вх.н}}$.

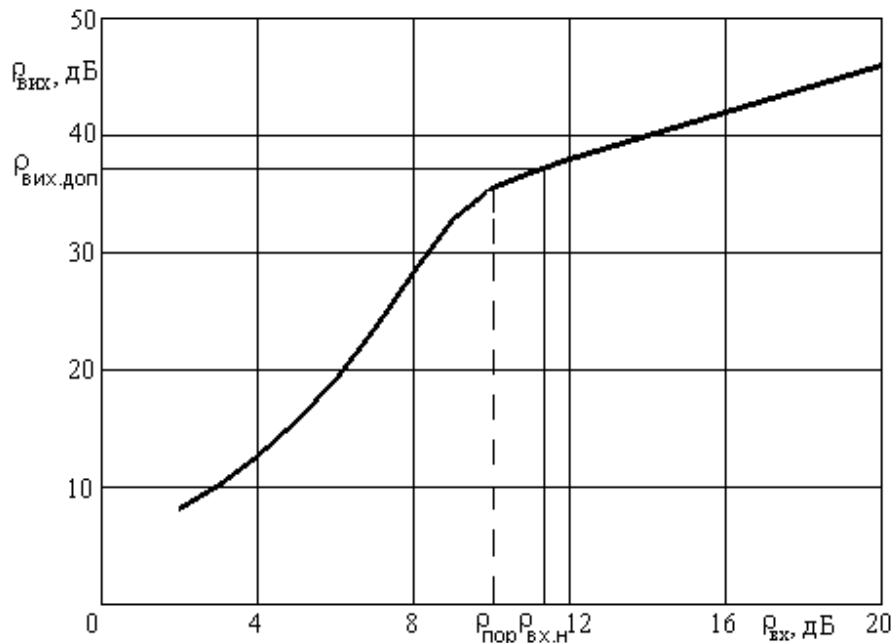


Рисунок 4 – Залежність $\rho_{\text{вих}}$ від $\rho_{\text{вх}}$ для демодулятора ЧМ сигналу

2. Смуга частот каналу зв'язку не задана. Так поставлена задача в завданні на виконання КР за варіантом А. Значення індексу модуляції вибирається тільки за умови роботи демодулятора в області порога і його значення ретельно оптимізується. Після обчислення орієнтовного значення $m_{\text{ЧМ2}}$ за формулою (6.7), використовуючи вираз (6.2), будують графіки залежностей $\rho_{\text{вих}} = f(\rho_{\text{вх}})$ для значення $m_{\text{ЧМ2}}$, отриманого вище, і значень $m_{\text{ЧМ2}} \pm 2$ і $m_{\text{ЧМ2}} \pm 4$ (ці значення індексу рекомендується округлити до ближчих цілих чисел). За отриманими залежностями визначають значення $m_{\text{ЧМ}}$, за якого $\rho_{\text{вих}}$ дорівнює заданому $\rho_{\text{вих.доп}}$, а $\rho_{\text{вх.н}}$ знаходиться в області або трохи вище порога. На відповідній кривій вказують точку, відповідну заданому $\rho_{\text{вих.доп}}$ і необхідному $\rho_{\text{вх.н}}$.

6.2 Розрахунки завадостійкості демодулятора сигналу дискретної модуляції

Вихідні дані:

- метод модуляції та спосіб прийому;
- канал зв'язку – з постійними параметрами і адитивним білим гауссовим шумом;
- допустима ймовірність помилки двійкового символу в каналі $p_{\text{доп}}$;
- тривалість двійкового символу T_6 .

Вимагається розрахувати:

- залежність ймовірності помилки біта від відношення сигнал/шум на вході демодулятора $p = f(h_6^2)$ та побудувати графік цієї залежності;
- значення необхідного відношення сигнал/шум на вході демодулятора h_{61}^2 , що забезпечує допустиму ймовірність помилки біта $p_{\text{доп}}$.

Розрахункові співвідношення

Завадостійкість демодулятора сигналу дискретної модуляції визначають ймовірністю помилки елемента модульованого сигналу $P_{\text{пом}}$ або ймовірністю помилки двійкового символу p . Ймовірності помилки $P_{\text{пом}}$ і p залежать від методу модуляції, способу прийому, відношення середньої енергії сигналів до питомої потужності завади та характеристик каналу зв'язку.

У табл. 5 наведені формули, які визначають ймовірність помилки двійкового символу під час передачі багатопозиційними сигналами гауссовим каналом зв'язку з постійними параметрами. Перерахунок ймовірності помилки елемента модульованого сигналу $P_{\text{пом}}$ в ймовірність помилки двійкового символу p було зроблено в припущенні, що використовується маніпуляційний код Грея.

Таблиця 5 – Ймовірність помилки двійкового символу під час передачі багатопозиційними сигналами

Спосіб прийому	Вид модуляції	Ймовірність помилки двійкового символу
Когерентний	ФМ-4	$p = 0,5[1 - \Phi(h_6\sqrt{2})]$
	ВФМ-4	$p = 0,5[1 - \Phi^2(h_6\sqrt{2})]$
	КАМ-16	$p = 0,25[1 - \Phi^2(0,9 h_6)]$
Некогерентний	ЧМ- M	$p = 0,25(M - 1) \exp(-0,5 h_6^2 \log_2 M)$; $M > 2$

В усіх формулах прийняті позначення:

$h_6^2 = E_6/N_0$ – відношення середньої енергії елементів модульованого сигналу, що витрачається на передачу одного двійкового символу, до питомої потужності шуму;

$$E_6 = P_S T_6;$$

P_S – середня потужність модульованого сигналу;

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp(-t^2 / 2) dt - \text{одна з форм інтегралу ймовірності (у підруч-$$

нику [1] ця форма називається функцією Крампа), яка табульована в математичних довідниках. За відсутності таблиць можна користуватися формулою апроксимації інтегралу ймовірності

$$\Phi(x) = 1 - 1,3 \exp(-0,44(x + 0,75)^2). \quad (6.8)$$

Для двійкових сигналів значення $P_{\text{пом}}$ і p збігаються. Формули для розрахунків ймовірності помилки символу при передачі двійкових сигналів гауссовим каналом зв'язку з постійними параметрами наведені в [1, розд. 6.5, 6.6; 2, табл. 15.2].

Оскільки при ЧМ-2, ФМ-2 і ВФМ-2 енергії елементів модульованих сигналів однакові, то у формулах для ймовірності помилки слід h^2 замінити на h_0^2 . При АМ-2 енергія одного з сигналів дорівнює нулю, тому у відповідних формулах слід h^2 замінити на $2h_0^2$.

Виконання розрахунків

Для заданого виду модуляції та способу прийому необхідно розрахувати і побудувати графік залежності $p = f(h_0^2)$. Під час побудови графіка масштаб для p повинен бути логарифмічним, а для значень h_0^2 , виражених у децибелах (h_0^2 [дБ] = $10 \lg h_0^2$), – лінійним. Під час розрахунків збільшують h_0^2 з кроком 1 дБ, починаючи з 2 дБ, до такого значення, коли p не виявиться меншою за $p_{\text{доп}}$. Приклад залежності, що розраховується, поданий на рис. 5 – крива $p = f(h_0^2)$.

Якщо в каналі зв'язку не використовується завадостійке кодування, то допустима ймовірність помилки символу на виході демодулятора дорівнює значенню $p_{\text{доп}}$, знайденому під час розрахунків параметрів ЦАП або декодера простого коду. Необхідно визначити відношення сигнал/шум для системи передачі без завадостійкого кодування h_{01}^2 , за якого $p = p_{\text{доп}}$, та показати на графіку значення $p_{\text{доп}}$ і h_{01}^2 .

7 ВИБІР КОРЕКТУЮЧОГО КОДУ І РОЗРАХУНОК ЗАВАДОСТІЙКОСТІ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ З КОДУВАННЯМ

Вихідні дані для розрахунків:

- необхідний ЕВК;
- метод модуляції в каналі зв'язку і спосіб прийому;
- тип неперервного каналу зв'язку – з постійними параметрами та адитивним білим гауссовим шумом;
- допустима ймовірність помилки двійкового символу на виході декодера $p_{\text{доп}}$;

- відношення сигнал/шум на вході демодулятора h_{61}^2 , що забезпечує допустиму ймовірність помилки $p_{\text{доп}}$ в каналі без завадостійкого кодування.

Вимагається:

- вибрати і обґрунтувати параметри коду, що забезпечує необхідний ЕВК: довжину коду n , число інформаційних символів k і кратність помилок, що виправляються, q_v ;

- розрахувати залежність ймовірності помилки символу на виході декодера від відношення сигнал/шум на вході демодулятора $p_d = f_1(h_6^2)$ при використанні вибраного коду;

- визначити одержаний ЕВК та порівняти його з необхідним.

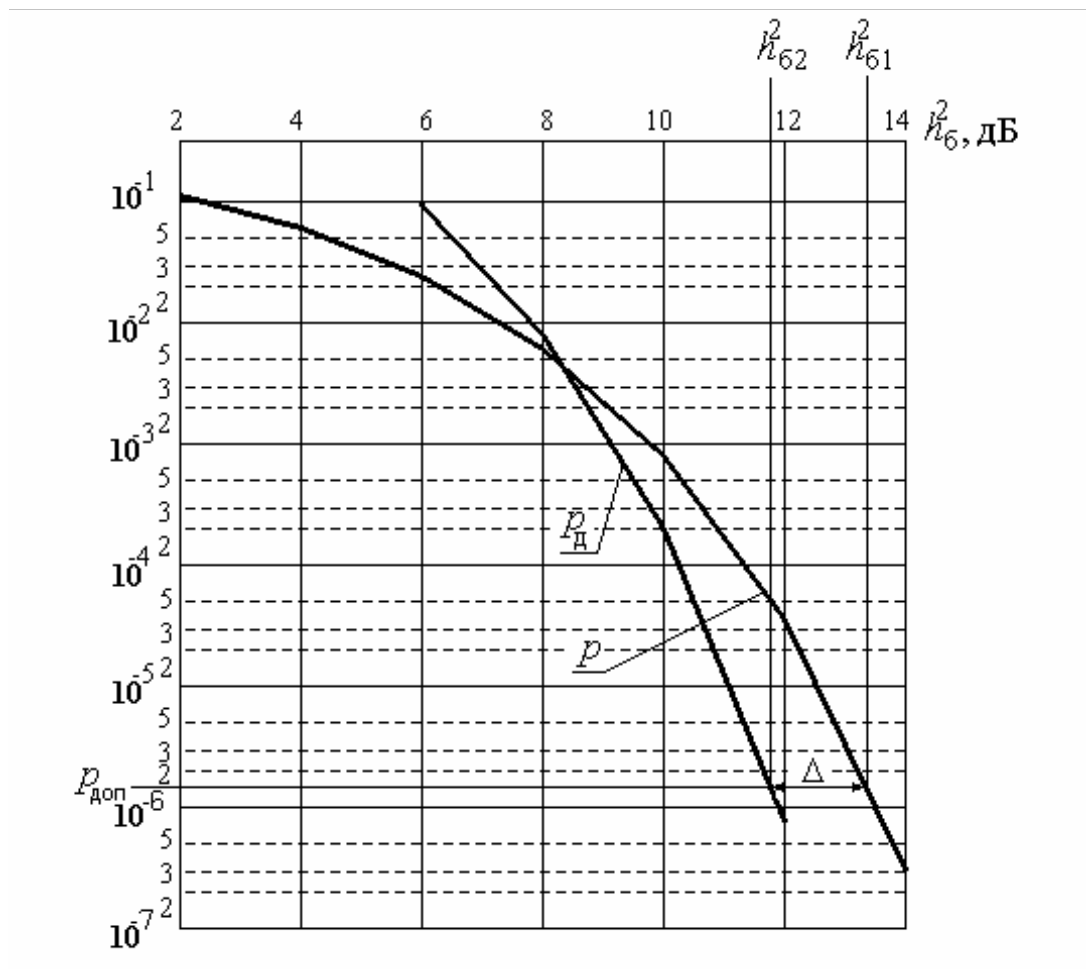


Рисунок 5 – Завадостійкість систем передачі без завадостійкого кодуванням та з ним

Розрахункові співвідношення

Коректуючі коди дозволяють підвищити завадостійкість і завдяки цьому зменшити необхідне відношення сигнал/шум на вході демодулятора для заданої ймовірності помилки прийнятих символів. Величина, що показує у скільки разів (на скільки децибел) зменшується необхідне відношення сигнал/шум на вході демодулятора завдяки використанню кодування, називається енергетичним виграшем кодування (ЕВК).

Канали зв'язку із завадостійким кодуванням і без нього зручно порівнювати, якщо як відношення сигнал/шум використати відношення середньої енергії сигналів, що витрачається на передачу одного інформаційного символу, до питомої потужності шуму $h_0^2 = E_0 / N_0 = P_S T_0 / N_0$.

Так, якщо в каналі зв'язку без кодування для забезпечення заданої ймовірності помилки необхідне відношення сигнал/шум h_{01}^2 , а в каналі зв'язку з кодуванням – h_{02}^2 , то ЕВК буде визначатися

$$\Delta = h_{01}^2 / h_{02}^2 \text{ або } \Delta [\text{дБ}] = h_{01}^2 [\text{дБ}] - h_{02}^2 [\text{дБ}]. \quad (7.1)$$

Під час декодування з виправленням помилок імовірність помилкового декодування кодових комбінацій $P_{\text{п.д}}$ визначається за умови, що число помилок у кодовій комбінації на вході декодера q перевищує кратність помилок, що виправляються $q_{\text{в}}$ [1, формула (5.15)]:

$$P_{\text{п.д}} = \sum_{q=q_{\text{в}}+1}^n P(q), \quad (7.2)$$

$$\text{де } P(q) = C_n^q p^q (1-p)^{n-q} \quad (7.3)$$

– імовірність помилки кратності q ;

$$C_n^q = \frac{n!}{q!(n-q)!} \quad (7.4)$$

– число сполучень із n по q ;

p – імовірність помилки двійкового символу на вході декодера, розрахунок якої для гауссового каналу зв'язку з постійними параметрами розглянутий у розд. 6.2. У використаних там формулах необхідно замість h_0^2 підставляти $h_0^2 k/n$ – врахувати зменшення тривалості символів через введення в кодові комбінації додаткових символів під час кодування і відповідне зменшення енергії сигналу на вході демодулятора.

Для переходу від імовірності $P_{\text{п.д}}$ до ймовірності помилки двійкового символу на виході декодера $p_{\text{д}}$ достатньо врахувати принцип виправлення помилок декодером: декодер заборонену кодову комбінацію замінює найближчою дозволеною. Тому, якщо число помилок у комбінації $q > q_{\text{в}}$, але $q \leq d_{\text{min}}$, то в результаті декодування комбінація буде містити d_{min} помилок (d_{min} – кодова віддаль). Оскільки помилки більш високої кратності малоімовірні, то остаточно можна вважати, що в помилково декодованій комбінації є d_{min} помилкових символів. У коректуючих кодів кодова віддаль $d_{\text{min}} \geq 2q_{\text{в}} + 1$. Оскільки при помилковому декодуванні кодової комбінації $2q_{\text{в}} + 1$ символів із n помилкові, то перехід від $P_{\text{п.д}}$ до $p_{\text{д}}$ виконується за формулою

$$p_{\text{д}} \approx P_{\text{п.д}} (2q_{\text{в}} + 1) / n. \quad (7.5)$$

Зв'язок між основними параметрами двійкових коректуючих кодів n , k і q_b встановлює верхня межа Хеммінга

$$2^{n-k} - 1 \geq \sum_{q=1}^{q_b} C_n^q. \quad (7.6)$$

З формул (7.2) – (7.6) випливає, що завадостійкість у каналі зв'язку з кодуванням і ЕВК складним чином залежать від параметрів коду n , k і q_b та відношення сигнал/шум h_0^2 . Крім того, один і той самий ЕВК може бути досягнутий при різних значеннях n , k і q_b .

Порядок вибору коду

З трьох параметрів коду n , k і q_b два можуть бути вибрані незалежно, а третій розрахований за формулою (7.6). Такими незалежними параметрами звичайно є n та q_b . Для їхнього вибору слід урахувати:

- з підвищенням q_b ЕВК збільшується, але при цьому різко зростає складність декодера;
- зі зростанням n ЕВК збільшується, але для великих n (порядку 100) ріст ЕВК уповільнюється, а потім може і зменшуватися.

Тому вибір параметрів коду ведеться підбором, шляхом послідовного переходу від простих кодів до більш складних. Щоб полегшити вибір параметрів коду, на рис. 6 та 7 наведені сімейства залежностей ЕВК від n для різних значень q_b . Дані рис. 6 відповідають когерентному прийому, а дані рис. 7 – некогерентному прийому. Для значень p_d , не наведених на рис. 6 та 7, ЕВК можна оцінити орієнтовно, вважаючи, що ЕВК лінійно залежить від $\lg p_d$.

Для заданих способу прийому і допустимої ймовірності помилки символу на виході декодера p_d за допомогою даних рис. 6 або 7 визначається кратність помилок, що виправляються, q_b і довжина коду n , за яких забезпечується задане значення ЕВК. Кожний з цих двох параметрів коду повинен бути якомога меншим, але, оскільки при збільшенні q_b сильніше, ніж при збільшенні n , зростає складність декодера, то, передусім, повинно бути мінімальним значення q_b . Після знаходження значень n та q_b визначається значення k за співвідношенням (7.6).

Для досконалих кодів нерівність (7.6) переходить у рівність і при цьому мінімізується число додаткових символів $n - k$ для фіксованих значень n і q_b . Широке розповсюдження дістали циклічні коди Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема (БЧХ). За параметрами вони близькі до досконалих кодів і разом з тим вимагають відносно простих схем кодерів та декодерів. У кодів БЧХ основні параметри пов'язані співвідношеннями:

$$k = n - tq_b, \quad (7.7)$$

де t – найменше ціле, за якого задовольняється нерівність-рівність

$$t \geq \log_2(n + 1). \quad (7.8)$$

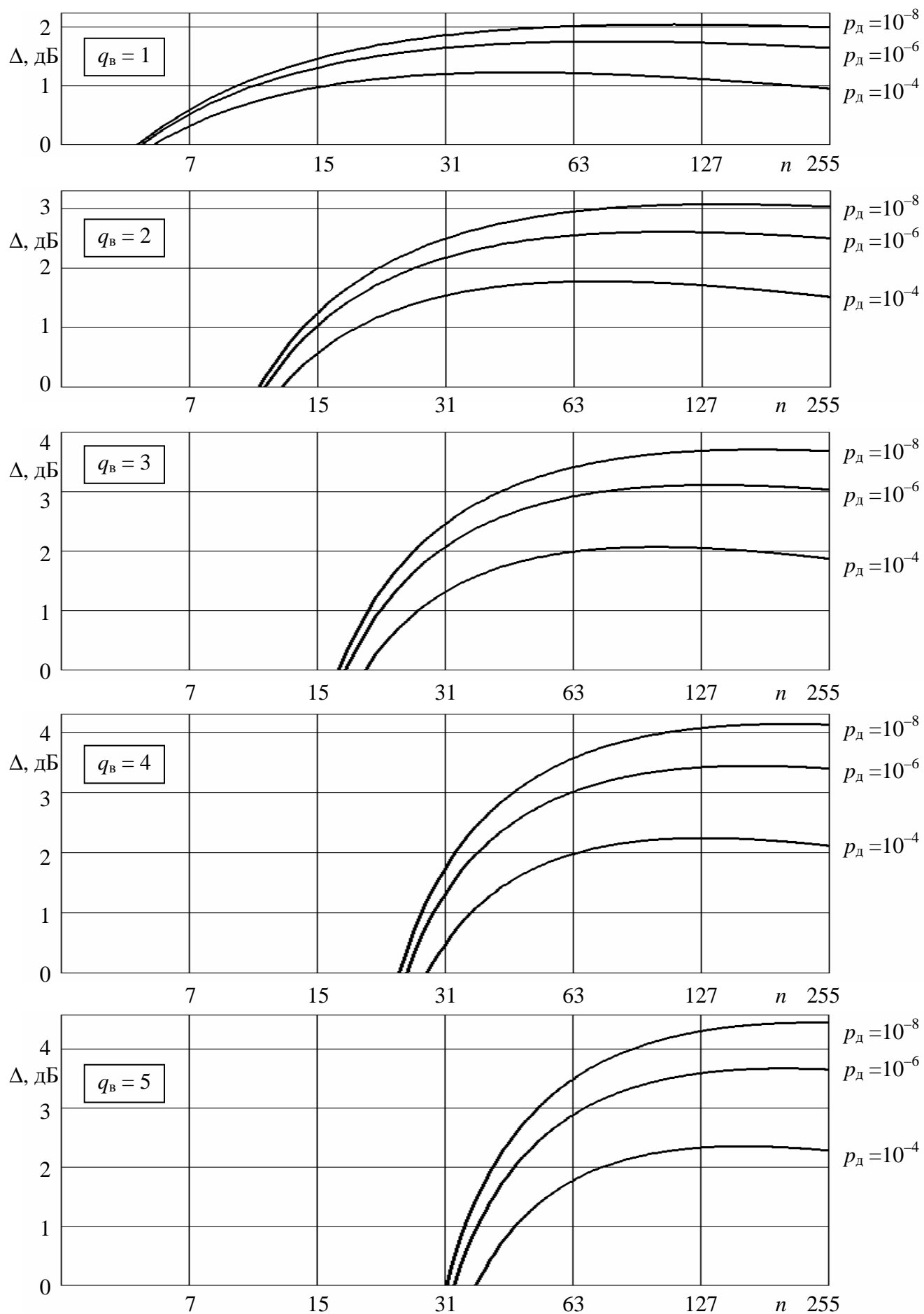


Рисунок 6 – ЕВК при когерентному прийомі

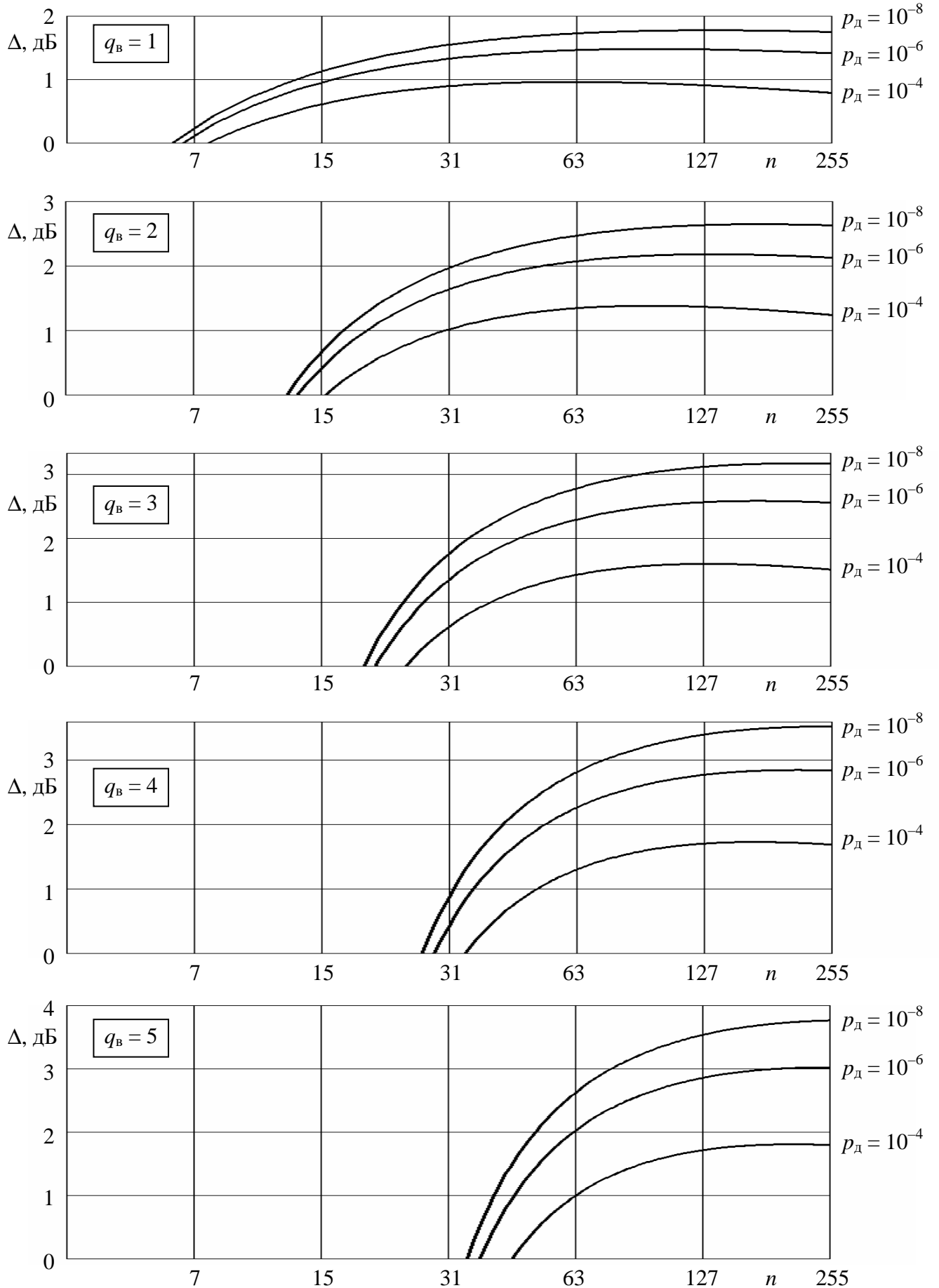


Рисунок 7 – ЕВК при некогерентному прийомі

Відзначимо, що на рис. 6 і 7 вказані значення n , які відповідають рівності $n = 2^m - 1$. Під час розрахунків як довжину коду n можна прийняти будь-яке проміжне значення.

Перевірка правильності вибору коду

Знайдені параметри коду n , k і q_v слід розглядати як орієнтовні, а правильність вибору коду підтвердити розрахунками. Для цього необхідно розрахувати:

- необхідне відношення сигнал/шум на вході демодулятора в каналі зв'язку із завадостійким кодуванням h_{62}^2 за формулою (7.1);

- імовірність помилки символу на виході демодулятора p за методикою, яка викладена в розд. 6.2, підставляючи замість h_6^2 у формулу для розрахунку p значення $h_6^2 k/n$;

- імовірність помилкового декодування кодової комбінації $P_{п.д}$ за формулами (7.2) – (7.4), у сумі у формулі (7.2) достатньо врахувати першу складову;

- імовірність помилки символу на виході декодера p_d за формулою (7.5).

Якщо одержане значення $p_d \leq p_{доп}$, то вибраний код забезпечує необхідний ЕВК, а якщо $p_d > p_{доп}$, то код не забезпечує необхідний ЕВК. Необхідно зробити розрахунки для 3 – 5 кодів. Результати розрахунків оформити у вигляді таблиці 6.

Таблиця 6 – Результати розрахунків для вибору коду

Код	n	q_v	k	h^2	p	$P_{п.д}$	p_d

На основі одержаних даних провадять обґрунтування вибору коду. Найкращим вважається код із мінімально можливим q_v і найменшим при цьому значенні n , за яких забезпечується заданий ЕВК, – це мінімізує складність кодека.

Після вибору коду слід розрахувати залежність, що характеризує завадостійкість у каналі зв'язку з коректуючим кодом. Для цього змінюють h_6^2 у таких межах, щоб величина p_d приймала значення від 0,1 до значення, що дещо менше за $p_{доп}$, будують залежність $p_d = f_1(h_6^2)$ аналогічно рис. 5, що характеризує завадостійкість у каналі зв'язку з вибраним кодом. За цією залежністю визначають необхідне відношення сигнал/шум на вході демодулятора h_{62}^2 , за якого забезпечується допустима ймовірність помилки символу на виході декодера, тобто $p_d = p_{доп}$. За знайденим значенням h_{62}^2 та одержаним під час розрахунку завадостійкості демодулятора значенням h_{61}^2 визначають ЕВК за формулою (7.1) і порівнюють його з необхідним.

8 РОЗРАХУНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ

Вихідні дані:

– тип каналу зв'язку – канал із постійними параметрами й адитивним білим гауссовим шумом;

– методи модуляції та параметри, що визначають ширину спектра модульованого сигналу: якщо модуляція дискретна, то – тривалість двійкового символу T_6 , число позицій сигналу M , швидкість коду k/n ; якщо модуляція аналогова, то – максимальна частота спектра первинного сигналу F_{\max} та індекс модуляції $m_{\text{ЧМ}}$ (для ЧМ);

– відношення сигнал/шум на виході каналу зв'язку, за якого забезпечується задана якість відновлення повідомлення: для сигналів дискретної модуляції h_{61}^2 і h_{62}^2 , для сигналів аналогової модуляції $\rho_{\text{вх.н}}$;

– продуктивність джерела повідомлень R_d .

Вимагається:

– розрахувати пропускну здатність каналу зв'язку C для всіх розглянутих варіантів передачі та зіставити її значення з продуктивністю джерела повідомлень R_d ;

– розрахувати коефіцієнти інформаційної η , частотної γ та енергетичної β ефективностей для всіх розглянутих варіантів передачі;

– побудувати графік межі Шеннона $\beta = f(\gamma)$;

– порівняти ефективність розглянутих варіантів передачі між собою та з граничною ефективністю.

Розрахункові співвідношення та порядок розрахунків

Під час розрахунків коефіцієнтів ефективності під каналом зв'язку розуміють сукупність засобів, що забезпечують передачу сигналів від виходу модулятора до входу демодулятора. Розрахункові формули – (10.1) – (10.3) в [1].

Пропускна здатність неперервного каналу зв'язку визначається формулою Шеннона (4.48) в [1]. Смуга пропускання каналу зв'язку F_k , що входить до цієї формули, приймається рівною ширині спектра модульованого сигналу F_s .

Під час передачі сигналів дискретної модуляції мінімально можлива ширина спектра сигналів визначається межею Найквіста [1, с. 284]: для АМ-М, ФМ-М, ВФМ-М і КАМ-М

$$F_s = 1/(T_c \log_2 M), \quad (8.1)$$

а для ЧМ-М

$$F_s = M/(T_c \log_2 M), \quad (8.2)$$

де T_c – тривалість двійкового символу на вході модулятора;

M – число позицій сигналу.

Якщо в системі передачі відсутнє завадостійке кодування, то значення T_c дорівнює тривалості двійкового символу T_6 на виході АЦП або кодера простого

коду. Якщо ж використовується завадостійке кодування, то $T_c = T_b k / n$, де n і k – параметри коректуючого коду.

Під час передачі сигналів аналогової модуляції розрахунки ширини спектра сигналу для АМ, БМ і ОМ надані в [1, с. 220; 2, розд. 3]. Ширина спектра сигналу ЧМ визначається формулою (6.4).

Для визначення відношення P_s/N_0 на виході каналу зв'язку за знайденими у розд. 6 і 7 відношеннями сигнал/шум слід користуватися формулами

$$h_b^2 = \frac{E_b}{N_0} = \frac{P_s}{N_0} \cdot T_b; \quad (8.3)$$

$$\rho_{\text{вх}} = \frac{P_s}{P_n} = \frac{P_s}{N_0} \cdot \frac{1}{F_k}. \quad (8.4)$$

Під час розрахунків ефективності швидкість передачі інформації в каналі R_k можна прийняти рівною продуктивності джерела R_d – для тієї якості відновлення повідомлень, що має місце в розрахованій системі зв'язку, втратами інформації в каналі зв'язку можна знехтувати. Результати розрахунків подати таблицею 7.

Таблиця 7 – Параметри порівнюваних систем передачі

Система передачі	Параметри						
	R_d , кбіт/с	F_k , кГц	P_s/N_0 , Гц	C , кбіт/с	η	β	γ
ЦСП без завадостійкого кодування							
ЦСП з завадостійким кодуванням							
Аналогова							

Під час побудови графіка граничної залежності $\beta = f(\gamma)$ (межі Шеннона [1, рис. 10.1]) значення β і γ відкладаються в логарифмічних одиницях – відповідно $10 \lg \beta$ і $10 \lg \gamma$. Порівняння розглянутих варіантів передачі між собою та з граничною ефективністю виконуються роздільно за коефіцієнтами β та γ . Якщо значення коефіцієнтів β та γ малі ($\beta < -10$ дБ і $\gamma < 3$ дБ), то необхідно вказати способи підвищення енергетичної та частотної ефективностей.

9 ВИСНОВКИ ДО КУРСОВОЇ РОБОТИ

Викласти стисло перелік виконаних розрахунків. Зазначити, чи відповідають виконані розрахунки вихідним даним і завданню на КР, а якщо ні, то які розрахунки і чому не відповідають завданню.

Указати переваги і недоліки розглянутих варіантів передачі. Який з розглянутих варіантів передачі, на Ваш погляд, є більш прийнятним для використання в реальній системі зв'язку і чому?

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. **Теория передачи сигналов:** Учебник для вузов / А. Г. Зюко и др. – М.: Радио и связь, 1986.
2. **Панфилов И. П., Дырда В. Е.** Теория электрической связи: Учебник для техникумов. – М.: Радио и связь, 1991.
3. **Панфілов І. П., Дирда В. Ю., Капацін А. В.** Теорія електричного зв'язку: Підручник для вузів першого та другого рівнів акредитації. – К.: Техніка, 1998.

Додаток 1

Таблиця Д.1 – Вихідні дані для КР за варіантом А

№ варіанту	Параметри джерела повідомлень				$\rho_{\text{вих.доп}}$, дБ	Метод модуляції	Параметри системи цифрової передачі			
	Розподіл імовірн.	P_b , В ²	K_a	F_{max} , кГц			$\rho_{\text{кв.доп}}$, дБ	Метод модуляції	Спосіб прийому	ЕВК, дБ
A-00	ГР	0,1	3	6,5	40	АМ	43	ЧМ-2	когерен.	1,5
A-01	ДЕР	0,3	4	8,0	37	ЧМ	40	ЧМ-2	некогер.	1,2
A-02	РР	0,5	*	2,4	38	БМ	41	ФМ-2	когерен.	2,8
A-03	ГР	0,7	5	2,7	36	ЧМ	39	ВФМ-2	когерен.	1,5
A-04	ДЕР	0,9	6	3,5	34	БМ	37	ВФМ-2	некогер.	2,7
A-05	РР	1,2	*	5000	44	ОМ	47	ФМ-4	когерен.	1,6
A-06	ГР	1,5	7	2,5	33	ЧМ	36	ВФМ-4	когерен.	2,2
A-07	ДЕР	1,8	8	12	31	АМ	34	ЧМ-4	некогер.	1,3
A-08	РР	2,0	*	3500	50	ОМ	53	ЧМ-8	некогер.	2,6
A-09	ГР	2,5	3	14	46	ЧМ	49	КАМ-16	когерен.	1,5
A-10	ДЕР	2,8	4	18	43	БМ	46	ФМ-4	когерен.	2,3
A-11	РР	3,0	*	800	38	ОМ	41	АМ-2	когерен.	1,2
A-12	ГР	0,2	5	12,5	42	ЧМ	45	АМ-2	некогер.	2,3
A-13	ДЕР	0,4	6	15	40	АМ	43	ЧМ-2	когерен.	1,4
A-14	РР	0,6	*	1,6	44	ЧМ	47	ЧМ-2	некогер.	2,5
A-15	ГР	0,8	7	4,5	39	БМ	42	ФМ-2	когерен.	1,3
A-16	ДЕР	1,0	8	7,0	37	ЧМ	40	ВФМ-2	когерен.	2,3
A-17	РР	1,1	*	0,8	50	ОМ	53	ВФМ-2	некогер.	1,1
A-18	ГР	1,3	3	7,5	40	ЧМ	43	ФМ-4	когерен.	2,1
A-19	ДЕР	1,4	4	9,5	39	АМ	42	ВФМ-4	когерен.	1,2
A-20	РР	1,6	*	100	38	ОМ	41	ЧМ-4	некогер.	1,8
A-21	ГР	2,2	5	11	36	ЧМ	39	ЧМ-8	некогер.	1,4
A-22	ДЕР	2,4	6	8,5	34	БМ	37	КАМ-16	когерен.	3,3
A-23	РР	2,6	*	0,1	44	ЧМ	47	ФМ-4	когерен.	1,4
A-24	ГР	1,9	7	2,5	33	АМ	36	АМ-2	когерен.	2,6
A-25	ДЕР	0,1	8	2,7	31	ЧМ	34	АМ-2	некогер.	1,5
A-26	РР	0,3	*	22	50	ОМ	53	ЧМ-2	когерен.	2,9
A-27	ГР	0,5	4	2,5	43	ЧМ	46	ЧМ-2	некогер.	1,6
A-28	ДЕР	0,7	5	12	42	БМ	45	ФМ-2	когерен.	2,4
A-29	РР	0,9	*	110	38	ОМ	41	ВФМ-2	когерен.	1,5
A-30	ГР	1,1	6	14	40	ЧМ	43	ВФМ-2	некогер.	2,0
A-31	ДЕР	1,3	7	12,5	39	АМ	42	ФМ-4	когерен.	1,7
A-32	РР	1,5	*	0,1	44	ЧМ	47	ВФМ-4	когерен.	2,8
A-33	ГР	1,7	8	15	37	БМ	40	ЧМ-4	некогер.	1,2
A-34	ДЕР	1,9	3	4,5	40	ЧМ	43	ЧМ-8	некогер.	1,4
A-35	РР	2,1	*	180	50	ОМ	53	КАМ-16	когерен.	2,6
A-36	ГР	2,3	4	7,0	37	ЧМ	40	ФМ-4	когерен.	1,8
A-37	ДЕР	2,5	5	7,5	36	АМ	39	АМ-2	когерен.	2,0
A-38	РР	2,7	*	56	38	ОМ	41	АМ-2	некогер.	1,8
A-39	ГР	2,9	6	9,5	34	ЧМ	37	ЧМ-2	когерен.	2,0
A-40	ДЕР	0,2	7	11	33	БМ	36	ЧМ-2	некогер.	1,3
A-41	РР	0,4	*	44	44	ОМ	47	ФМ-2	когерен.	3,6
A-42	ГР	0,6	8	8,5	31	ЧМ	34	ВФМ-2	когерен.	2,3
A-43	ДЕР	0,8	3	2,5	46	АМ	49	ВФМ-2	некогер.	1,8
A-44	РР	1,0	*	95	50	ОМ	53	ФМ-4	когерен.	2,2
A-45	ГР	1,2	4	2,7	43	ЧМ	46	ВФМ-4	когерен.	2,7
A-46	ДЕР	1,4	5	2,5	42	БМ	45	ЧМ-4	некогер.	1,9
A-47	РР	1,6	*	120	38	ОМ	41	ЧМ-8	некогер.	1,7
A-48	ГР	1,8	6	12	40	ЧМ	43	КАМ-16	когерен.	2,6
A-49	ДЕР	2,0	7	14	39	АМ	42	ФМ-4	когерен.	2,9

Закінчення таблиці Д.1

№ варіанту	Параметри джерела повідомлень				$\rho_{\text{вих.доп}}$ дБ	Метод модуляції	Параметри системи цифрової передачі			
	Розподіл імовірн.	P_b , B^2	K_a	F_{max} , кГц			$\rho_{\text{кв.доп}}$ дБ	Метод модуляції	Спосіб прийому	ЕВК, дБ
A-50	PP	2,2	*	144	44	0M	47	AM-2	когерен.	1,5
A-51	GP	2,4	3,5	22	39	0M	42	AM-2	некогер.	2,1
A-52	DEP	2,6	3,5	1,5	45	ЧМ	48	ЧМ-2	когерен.	1,6
A-53	PP	2,8	*	380	50	0M	53	ЧМ-2	некогер.	1,8
A-54	GP	3,0	4,5	2,7	36	ЧМ	39	ФМ-2	когерен.	1,4
A-55	DEP	0,01	4,5	7,4	42	AM	45	ВФМ-2	когерен.	2,6
A-56	PP	0,1	*	500	38	0M	41	ВФМ-2	некогер.	1,1
A-57	GP	0,02	5,5	16	35	ЧМ	38	ФМ-4	когерен.	2,3
A-58	DEP	0,2	5,5	12,5	41	БМ	44	ВФМ-4	когерен.	1,3
A-59	PP	0,03	*	0,24	44	ЧМ	47	ЧМ-4	некогер.	1,7
A-60	GP	0,3	6,5	15	33	AM	36	ЧМ-8	некогер.	1,1
A-61	DEP	0,04	6,5	2,8	39	ЧМ	42	КАМ-16	когерен.	3,1
A-62	PP	0,4	*	12	50	0M	53	ФМ-4	когерен.	1,8
A-63	GP	0,05	7,5	3,3	32	ЧМ	35	AM-2	когерен.	2,7
A-64	DEP	0,5	7,5	4,4	38	БМ	41	AM-2	некогер.	1,5
A-65	PP	0,06	*	300	38	0M	41	ЧМ-2	когерен.	2,5
A-66	GP	0,6	8	5,5	31	ЧМ	34	ЧМ-2	некогер.	1,6
A-67	DEP	0,07	8	6,5	37	AM	40	ФМ-2	когерен.	2,2
A-68	PP	0,7	*	9,6	44	ЧМ	47	ВФМ-2	когерен.	2,7
A-69	GP	0,08	3,5	4,3	45	БМ	48	ВФМ-2	некогер.	2,0
A-70	DEP	0,8	4,5	7,5	42	ЧМ	45	ФМ-4	когерен.	2,4
A-71	PP	0,09	*	10,2	50	0M	53	ВФМ-4	когерен.	2,8
A-72	GP	0,9	5,5	4,8	42	ЧМ	45	ЧМ-4	некогер.	2,1
A-73	DEP	0,1	6,5	5,2	39	AM	42	ЧМ-8	некогер.	1,9
A-74	PP	1,0	*	1,5	38	ЧМ	41	КАМ-16	когерен.	2,3
A-75	GP	0,12	7,5	3,6	38	БМ	41	ФМ-4	когерен.	2,5
A-76	DEP	1,2	8	10,0	31	ЧМ	34	AM-2	когерен.	2,7
A-77	PP	0,15	*	240	44	0M	47	AM-2	некогер.	1,8
A-78	GP	1,5	6	4,5	40	ЧМ	43	ЧМ-2	когерен.	2,0
A-79	DEP	0,2	3	5,6	46	AM	49	ЧМ-2	некогер.	1,6
A-80	PP	2,0	*	480	50	0M	53	ФМ-2	когерен.	2,2
A-81	GP	0,25	4	11	37	ЧМ	40	ВФМ-2	когерен.	2,3
A-82	DEP	2,5	5,5	14	35	БМ	38	ВФМ-2	некогер.	1,8
A-83	PP	0,3	*	75	38	0M	41	ФМ-4	когерен.	1,6
A-84	GP	3,0	6,5	2,6	39	ЧМ	42	ВФМ-4	когерен.	2,6
A-85	DEP	0,35	7,5	6,5	38	AM	41	ЧМ-4	некогер.	1,5
A-86	PP	0,65	*	68	44	0M	47	ЧМ-8	некогер.	2,0
A-87	GP	0,4	6,5	16	33	ЧМ	36	КАМ-16	когерен.	2,6
A-88	DEP	0,7	5,5	6,3	35	БМ	38	ФМ-4	когерен.	2,3
A-89	PP	0,45	*	18	50	ЧМ	53	AM-2	когерен.	1,7
A-90	GP	0,75	3,5	8,2	45	AM	48	AM-2	некогер.	1,3
A-91	DEP	0,5	8	18	31	ЧМ	34	ЧМ-2	когерен.	1,8
A-92	PP	0,8	*	72	38	0M	41	ЧМ-2	некогер.	1,5
A-93	GP	0,55	4,5	6,4	36	ЧМ	39	ФМ-2	когерен.	2,8
A-94	DEP	0,85	6,0	12	40	БМ	43	ВФМ-2	когерен.	3,1
A-95	PP	0,6	*	0,6	44	ЧМ	47	ВФМ-2	некогер.	2,4
A-96	GP	0,9	7,0	2,75	39	AM	39	ФМ-4	когерен.	2,7
A-97	DEP	0,65	3,0	13	40	ЧМ	43	ВФМ-4	когерен.	2,0
A-98	PP	0,95	*	2,4	50	0M	53	ЧМ-4	некогер.	1,8
A-99	GP	0,7	5,0	14,5	42	ЧМ	45	ЧМ-8	некогер.	1,6

* – при рівномірному розподілі ймовірностей $K_a = \sqrt{3}$

Додаток 2

Таблиця Д.2 – Вихідні дані для КР за варіантом Ц

Номер варіанту	Параметри джерела повідомлень				$\rho_{\text{вих,доп}}$ дБ	$\rho_{\text{кв,доп}}$ дБ	Метод модуляції	Спосіб прийому	ЕВК, дБ
	Розподіл імовірн.	P_b, B^2	K_a	$F_{\text{max}}, \text{кГц}$					
Ц-00	ГР	3,0	5	6,5	36	39	АМ-2	когерен.	1,2
Ц-01	ДЕР	1,2	8	12	31	34	АМ-2	некогер.	1,6
Ц-02	РР	2,5	*	2,4	38	41	ЧМ-2	некогер.	1,5
Ц-03	ГР	0,1	5	6,5	42	45	ЧМ-2	когерен.	1,2
Ц-04	ДЕР	0,3	5,5	8,0	42	45	ФМ-2	когерен.	2,8
Ц-05	РР	0,5	*	2,4	44	47	ВФМ-2	когерен.	2,6
Ц-06	ГР	0,7	3	2,7	40	43	ВФМ-2	некогер.	2,0
Ц-07	ДЕР	0,9	4	3,5	37	40	ФМ-4	когерен.	2,2
Ц-08	РР	1,2	*	5000	50	53	ВФМ-4	когерен.	3,0
Ц-09	ГР	1,5	3,5	2,5	39	42	ЧМ-4	некогер.	1,5
Ц-10	ДЕР	1,8	4,5	12	36	39	ЧМ-8	некогер.	1,7
Ц-11	РР	2,0	*	3500	38	41	КАМ-16	когерен.	2,3
Ц-12	ГР	2,5	4,5	14	42	45	ФМ-4	когерен.	2,5
Ц-13	ДЕР	2,8	6,5	18	33	36	АМ-2	когерен.	2,7
Ц-14	РР	3,0	*	800	44	47	АМ-2	некогер.	1,9
Ц-15	ГР	0,2	7	12,5	39	42	ЧМ-2	когерен.	3,0
Ц-16	ДЕР	0,4	8	15	37	40	ЧМ-2	некогер.	2,0
Ц-17	РР	0,6	*	1,6	50	53	ФМ-2	когерен.	3,2
Ц-18	ГР	0,8	3,5	4,5	45	48	ВФМ-2	когерен.	3,4
Ц-19	ДЕР	1,0	4,5	7,0	36	39	ВФМ-2	некогер.	2,2
Ц-20	РР	1,1	*	0,8	38	41	ФМ-4	когерен.	3,6
Ц-21	ГР	1,3	5,5	7,5	42	45	ВФМ-4	когерен.	1,8
Ц-22	ДЕР	1,4	6,5	9,5	37	40	ЧМ-4	некогер.	1,1
Ц-23	РР	1,6	*	100	44	47	ЧМ-8	некогер.	1,2
Ц-24	ГР	2,2	4,5	11	42	45	КАМ-16	когерен.	2,0
Ц-25	ДЕР	2,4	6,5	8,5	33	36	ФМ-4	когерен.	2,2
Ц-26	РР	2,6	*	0,1	50	53	АМ-2	когерен.	2,5
Ц-27	ГР	1,9	3,5	2,5	45	48	АМ-2	некогер.	1,3
Ц-28	ДЕР	0,1	3	2,7	46	49	ЧМ-2	когерен.	2,4
Ц-29	РР	0,3	*	22	38	41	ЧМ-2	некогер.	1,8
Ц-30	ГР	0,5	3,5	2,5	39	42	ФМ-2	когерен.	3,4
Ц-31	ДЕР	0,7	4,5	12	42	45	ВФМ-2	когерен.	3,0
Ц-32	РР	0,9	*	110	44	47	ВФМ-2	некогер.	1,3
Ц-33	ГР	1,1	4,5	14	36	39	ФМ-4	когерен.	3,5
Ц-34	ДЕР	1,3	7	12,5	39	42	ВФМ-4	когерен.	3,5
Ц-35	РР	1,5	*	0,1	50	53	ЧМ-4	некогер.	1,6
Ц-36	ГР	1,7	8	15	37	40	ЧМ-8	некогер.	1,7
Ц-37	ДЕР	1,9	3,5	4,5	45	48	КАМ-16	когерен.	1,7
Ц-38	РР	2,1	*	180	38	41	ФМ-4	когерен.	1,9
Ц-39	ГР	2,3	4,5	7,0	36	39	АМ-2	когерен.	2,0
Ц-40	ДЕР	2,5	5,5	7,5	42	45	АМ-2	некогер.	1,2
Ц-41	РР	2,7	*	56	44	47	ЧМ-2	когерен.	2,3
Ц-42	ГР	2,9	6,5	9,5	39	42	ЧМ-2	некогер.	1,4
Ц-43	ДЕР	0,2	4,5	11	36	39	ФМ-2	когерен.	2,5
Ц-44	РР	0,4	*	44	50	53	ВФМ-2	когерен.	2,7
Ц-45	ГР	0,6	6,5	8,5	33	36	ВФМ-2	некогер.	1,5
Ц-46	ДЕР	3,5	0,8	2,5	45	48	ФМ-4	когерен.	2,8
Ц-47	РР	1,0	*	95	44	47	ВФМ-4	когерен.	3,0
Ц-48	ГР	1,2	3	2,7	40	43	ЧМ-4	некогер.	1,6
Ц-49	ДЕР	1,4	3,5	2,5	45	48	ЧМ-8	некогер.	1,8

Закінчення таблиці Д.2

Номер варіанту	Параметри джерела повідомлень				$\rho_{\text{вих.доп}}$ дБ	$\rho_{\text{кв.доп}}$ дБ	Метод модуляції	Спосіб прийому	ЕВК, дБ
	Розподіл імовірн.	P_b, V^2	K_a	F_{max} , кГц					
Ц-50	PP	1,6	*	120	50	53	КАМ-16	когерен.	1,7
Ц-51	ГР	1,8	4,5	12	36	39	ФМ-4	когерен.	2,7
Ц-52	ДЕР	2,0	4,5	14	42	45	АМ-2	когерен.	2,8
Ц-53	PP	2,2	*	144	38	41	АМ-2	некогер.	1,9
Ц-54	ГР	2,4	3,5	22	39	42	ЧМ-2	когерен.	2,4
Ц-55	ДЕР	2,6	3,5	1,5	45	48	ЧМ-2	некогер.	1,4
Ц-56	PP	2,8	*	380	44	47	ФМ-2	когерен.	2,5
Ц-57	ГР	3,0	4,5	2,7	36	39	ВФМ-2	когерен.	2,7
Ц-58	ДЕР	0,01	4,5	7,4	42	45	ВФМ-2	некогер.	1,8
Ц-59	PP	0,1	*	500	50	53	ФМ-4	когерен.	2,8
Ц-60	ГР	0,02	5,5	16	35	38	ВФМ-4	когерен.	3,0
Ц-61	ДЕР	0,2	5,5	12,5	41	44	ЧМ-4	некогер.	2,0
Ц-62	PP	0,03	*	0,24	38	41	ЧМ-8	некогер.	2,0
Ц-63	ГР	0,3	6,5	15	39	42	КАМ-16	когерен.	2,6
Ц-64	ДЕР	0,04	7,0	2,8	39	42	ФМ-4	когерен.	1,8
Ц-65	PP	0,4	*	12	44	47	АМ-2	когерен.	1,8
Ц-66	ГР	0,05	7,5	3,3	32	35	АМ-2	некогер.	1,5
Ц-67	ДЕР	0,5	8,0	4,4	31	34	ЧМ-2	когерен.	2,5
Ц-68	PP	0,06	*	300	50	53	ЧМ-2	некогер.	1,2
Ц-69	ГР	0,6	5	5,5	42	45	ФМ-2	когерен.	2,8
Ц-70	ДЕР	0,07	9,0	6,5	30	33	ВФМ-2	когерен.	2,2
Ц-71	PP	0,7	*	9,6	38	41	ВФМ-2	некогер.	3,0
Ц-72	ГР	0,08	3,5	4,3	45	48	ФМ-4	когерен.	2,1
Ц-73	ДЕР	0,8	4,5	7,5	42	45	ВФМ-4	когерен.	2,4
Ц-74	PP	0,09	*	10,2	44	47	ЧМ-4	некогер.	1,6
Ц-75	ГР	0,9	5,5	4,8	42	45	ЧМ-8	некогер.	2,0
Ц-76	ДЕР	0,1	6,5	5,2	39	42	КАМ-16	когерен.	3,0
Ц-77	PP	1,0	*	1,5	50	53	ФМ-4	когерен.	2,8
Ц-78	ГР	0,12	7,5	3,6	38	41	АМ-2	когерен.	1,6
Ц-79	ДЕР	1,2	8,0	10,0	37	40	АМ-2	некогер.	1,2
Ц-80	PP	0,15	*	240	38	41	ЧМ-2	когерен.	1,8
Ц-81	ГР	1,5	8,5	4,5		3639	ЧМ-2	некогер.	1,4
Ц-82	ДЕР	0,2	3	5,6	46	49	ФМ-2	когерен.	2,3
Ц-83	PP	2,0	*	480	44	47	ВФМ-2	когерен.	2,7
Ц-84	ГР	0,25	4,5	11	36	39	ВФМ-2	некогер.	2,1
Ц-85	ДЕР	2,5	5,5	14	35	38	ФМ-4	когерен.	3,0
Ц-86	PP	0,3	*	75	50	53	ВФМ-4	когерен.	2,0
Ц-87	ГР	3,0	6,5	2,6	33	36	ЧМ-4	некогер.	2,0
Ц-88	ДЕР	0,35	7,5	6,5	38	41	ЧМ-8	некогер.	1,3
Ц-89	PP	0,65	*	68	38	41	КАМ-16	когерен.	2,5
Ц-90	ГР	0,4	6,5	16	39	42	ФМ-4	когерен.	2,8
Ц-91	ДЕР	0,7	5,5	6,3	42	45	АМ-2	когерен.	1,6
Ц-92	PP	0,45	*	18	44	47	АМ-2	некогер.	1,2
Ц-93	ГР	0,75	4	8,2	37	40	ЧМ-2	когерен.	1,8
Ц-94	ДЕР	0,5	8	18	31	34	ЧМ-2	некогер.	1,4
Ц-95	PP	0,8	*	72	50	53	ФМ-2	когерен.	2,0
Ц-96	ГР	0,55	4,5	6,4	42	45	ВФМ-2	когерен.	2,3
Ц-97	ДЕР	0,85	6,0	12	40	43	ВФМ-2	некогер.	2,0
Ц-98	PP	0,6	*	0,6	38	41	ФМ-4	когерен.	2,6
Ц-99	ГР	0,9	7,0	2,75	39	42	ВФМ-4	когерен.	2,8

* – при рівномірному розподілі ймовірностей $K_a = \sqrt{3}$

Додаток 3

Таблиця Д.3 – Вихідні дані для КР за варіантом Д

Номер варіанту	Джерело повідомлень	$P_{\text{зп.доп}}$	B , Бод	Метод модуляції	Спосіб прийому	ЕВК, дБ
Д-00	$M_a = 32$	1E-7	50	АМ-2	когерент.	1,6
Д-01	український текст	2E-7	9600	АМ-2	некогер.	2,8
Д-02	$M_a = 64$	3E-7	4800	ЧМ-2	когерент.	1,5
Д-03	російський текст	4E-7	2400	ЧМ-2	некогер.	2,7
Д-04	$M_a = 128$	7E-7	1200	ФМ-2	когерент.	1,6
Д-05	англійський текст	1E-6	600	ВФМ-2	когерент.	2,2
Д-06	$M_a = 32$	2E-6	300	ВФМ-2	некогер.	1,3
Д-07	український текст	2E-6	200	ФМ-4	когерент.	2,6
Д-08	$M_a = 64$	3E-6	150	ВФМ-4	когерент.	1,5
Д-09	російський текст	4E-6	100	ЧМ-4	некогер.	2,3
Д-10	$M_a = 128$	7E-6	75	ЧМ-8	некогер.	1,2
Д-11	англійський текст	1E-5	50	КАМ-16	когерент.	2,3
Д-12	$M_a = 32$	2E-5	9600	ФМ-4	когерент.	1,35
Д-13	український текст	2E-5	4800	АМ-2	когерент.	2,5
Д-14	$M_a = 64$	3E-5	2400	АМ-2	некогер.	1,25
Д-15	російський текст	4E-5	1200	ЧМ-2	когерент.	2,3
Д-16	$M_a = 128$	7E-5	600	ЧМ-2	некогер.	1,1
Д-17	англійський текст	5E-5	300	ФМ-2	когерент.	2,1
Д-18	$M_a = 32$	1E-4	200	ВФМ-2	когерент.	1,2
Д-19	український текст	2E-4	150	ВФМ-2	некогер.	1,8
Д-20	$M_a = 64$	2E-7	100	ФМ-4	когерент.	1,6
Д-21	російський текст	2E-7	75	ВФМ-4	когерент.	3,3
Д-22	$M_a = 128$	4E-7	50	ЧМ-4	некогер.	1,35
Д-23	англійський текст	4E-7	9600	ЧМ-8	некогер.	2,6
Д-24	$M_a = 32$	5E-7	4800	КАМ-16	когерент.	1,5
Д-25	український текст	1E-6	2400	ФМ-4	когерент.	3,1
Д-26	$M_a = 64$	2E-6	1200	АМ-2	когерент.	1,55
Д-27	російський текст	2E-6	600	АМ-2	некогер.	2,4
Д-28	$M_a = 128$	4E-6	300	ЧМ-2	когерент.	1,45
Д-29	англійський текст	5E-6	200	ЧМ-2	некогер.	1,65
Д-30	$M_a = 32$	4E-6	150	ФМ-2	когерент.	2,0
Д-31	український текст	1E-5	100	ВФМ-2	когерент.	2,8
Д-32	$M_a = 64$	2E-5	75	ВФМ-2	некогер.	1,15
Д-33	російський текст	2E-5	50	ФМ-4	когерент.	2,6
Д-34	$M_a = 128$	4E-5	9600	ВФМ-4	когерент.	1,35
Д-35	англійський текст	4E-5	4800	ЧМ-4	некогер.	1,8
Д-36	$M_a = 32$	5E-5	2400	ЧМ-8	некогер.	1,1
Д-37	український текст	8E-5	1200	КАМ-16	когерент.	2,0
Д-38	$M_a = 64$	1E-4	400	ФМ-4	когерент.	1,25
Д-39	російський текст	2E-7	700	АМ-2	когерент.	3,6
Д-40	$M_a = 128$	3E-7	700	АМ-2	некогер.	1,4
Д-41	англійський текст	3E-7	750	ЧМ-2	когерент.	3,3
Д-42	$M_a = 32$	4E-7	700	ЧМ-2	некогер.	1,35
Д-43	український текст	9E-7	775	ФМ-2	когерент.	3,1
Д-44	$M_a = 64$	2E-6	50	ВФМ-2	когерент.	1,65
Д-45	російський текст	2E-6	9600	ВФМ-2	некогер.	2,6
Д-46	$M_a = 128$	3E-6	4800	ФМ-4	когерент.	1,75
Д-47	англійський текст	3E-6	2400	ВФМ-4	когерент.	2,9
Д-48	$M_a = 32$	3E-6	1200	ЧМ-4	некогер.	1,2
Д-49	український текст	4E-6	600	ЧМ-8	некогер.	2,25

Закінчення таблиці Д.3

Номер варіанту	Джерело повідомлень	$P_{\text{зн.доп}}$	B , Бод	Метод модуляції	Спосіб прийому	ЕВК, дБ
Д-50	$M_a = 64$	1E-5	300	КАМ-16	когерент.	1,7
Д-51	російський текст	1E-5	200	ФМ-4	когерент.	2,7
Д-52	$M_a = 128$	3E-5	150	АМ-2	когерент.	2,8
Д-53	англійський текст	2E-5	100	АМ-2	некогер.	1,9
Д-54	$M_a = 32$	3E-5	75	ЧМ-2	когерент.	2,4
Д-55	український текст	4E-5	50	ЧМ-2	некогер.	1,4
Д-56	$M_a = 64$	5E-5	9600	ФМ-2	когерент.	2,5
Д-57	російський текст	7E-5	4800	ВФМ-2	когерент.	2,7
Д-58	$M_a = 128$	9E-5	2400	ВФМ-2	некогер.	1,8
Д-59	англійський текст	1E-4	1200	ФМ-4	когерент.	2,8
Д-60	$M_a = 32$	2E-4	600	ВФМ-4	когерент.	3,0
Д-61	український текст	2E-4	300	ЧМ-4	некогер.	2,0
Д-62	$M_a = 64$	2E-4	200	ЧМ-8	некогер.	2,0
Д-63	російський текст	1E-7	150	КАМ-16	когерент.	2,6
Д-64	$M_a = 128$	2E-7	100	ФМ-4	когерент.	1,8
Д-65	англійський текст	3E-7	75	АМ-2	когерент.	1,8
Д-66	$M_a = 32$	4E-7	50	АМ-2	некогер.	1,5
Д-67	український текст	5E-7	9600	ЧМ-2	когерент.	2,5
Д-68	$M_a = 64$	6E-7	4800	ЧМ-2	некогер.	1,2
Д-69	російський текст	7E-7	2400	ФМ-2	когерент.	2,8
Д-70	$M_a = 128$	8E-7	1200	ВФМ-2	когерент.	2,2
Д-71	англійський текст	9E-7	600	ВФМ-2	некогер.	3,0
Д-72	$M_a = 32$	1E-6	300	ФМ-4	когерент.	2,1
Д-73	український текст	2E-6	200	ВФМ-4	когерент.	2,4
Д-74	$M_a = 64$	3E-6	150	ЧМ-4	некогер.	1,6
Д-75	російський текст	4E-6	100	ЧМ-8	некогер.	2,0
Д-76	$M_a = 128$	5E-6	75	КАМ-16	когерент.	3,0
Д-77	англійський текст	6E-6	50	ФМ-4	когерент.	2,8
Д-78	$M_a = 32$	7E-6	9600	АМ-2	когерент.	1,6
Д-79	український текст	8E-6	4800	АМ-2	некогер.	1,2
Д-80	$M_a = 64$	9E-6	2400	ЧМ-2	когерент.	1,8
Д-81	російський текст	1E-5	1200	ЧМ-2	некогер.	1,4
Д-82	$M_a = 128$	2E-6	600	ФМ-2	когерент.	2,3
Д-83	англійський текст	2E-6	300	ВФМ-2	когерент.	2,7
Д-84	$M_a = 32$	3E-6	200	ВФМ-2	некогер.	2,1
Д-85	український текст	4E-6	150	ФМ-4	когерент.	3,0
Д-86	$M_a = 64$	5E-6	100	ВФМ-4	когерент.	2,0
Д-87	російський текст	6E-6	75	ЧМ-4	некогер.	2,0
Д-88	$M_a = 128$	8E-6	50	ЧМ-8	некогер.	1,3
Д-89	англійський текст	1E-5	9600	КАМ-16	когерент.	2,5
Д-90	$M_a = 32$	2E-5	4800	ФМ-4	когерент.	2,8
Д-91	український текст	3E-5	2400	АМ-2	когерент.	1,6
Д-92	$M_a = 64$	4E-5	1200	АМ-2	некогер.	1,2
Д-93	російський текст	5E-5	600	ЧМ-2	когерент.	1,8
Д-94	$M_a = 128$	6E-5	300	ЧМ-2	некогер.	1,4
Д-95	англійський текст	7E-5	200	ФМ-2	когерент.	2,0
Д-96	$M_a = 32$	8E-5	150	ВФМ-2	когерент.	2,3
Д-97	український текст	1E-4	100	ВФМ-2	некогер.	2,0
Д-98	$M_a = 64$	1E-4	75	ФМ-4	когерент.	2,6
Д-99	російський текст	2E-4	50	ВФМ-4	когерент.	2,8

Додаток 4

ОСНОВНІ ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ

1 Пояснювальна записка виконується на одному боці аркуша (можна і з двох боків) білого паперу формату А4 (297х210 мм). Текст пояснювальної записки виконується рукописним способом (чорнилом або пастою темного кольору) або на ЕОМ у редакторі Word, шрифт Times New Roman Cyr, розмір 14, міжрядковий інтервал одинарний. На аркуші залишають поля: ліве, верхнє та нижнє не менш за 20 мм, праве не менш за 10 мм.

2 Пояснювальна записка повинна містити:

- титульний аркуш;
- вихідні дані до завдання на курсову роботу;
- чистий аркуш для рецензії керівника;
- зміст;
- основну частину;
- висновки;
- перелік посилань.

3 Сторінки пояснювальної записки нумерують арабськими цифрами. Номер сторінки проставляють у правому верхньому куті аркуша.

4 Текст пояснювальної записки ділять на розділи у відповідності до завдання. Розділи повинні мати порядкові номери арабськими цифрами та назви.

5 Текст пояснювальної записки має бути чітким і не допускати різних тлумачень. При цьому використовуються терміни, позначення та визначення, вживані в курсі ТЕЗ і попередніх курсах ТЕК і вищої математики, а також у рекомендованій навчальній та спеціальній літературі. До використаних формул повинні бути надані посилання на джерела, а до використаних числових значень – пояснення щодо їх походження. Результати розрахунків супроводжуються зазначенням відповідних одиниць виміру.

6 Ілюстрації (графіки, схеми) виконуються комп'ютерними засобами, а при рукописному способі – тушшю, чорним чорнилом або пастою на аркушах з текстом, або на кальці, при цьому в тексті залишають вільне місце для кальки.

7 Ілюстрації та таблиці обов'язково нумерують та надають назву (наприклад, “Рисунок 1.1 – Структурна схема системи передачі” – перший рисунок першого розділу). Номер та назва розміщуються: для ілюстрацій – внизу (під ілюстрацією), для таблиць – зверху (над таблицею).

8 Умовні графічні позначення на функціональних і структурних схемах повинні відповідати вимогам ЄСКД.

9 Перелік посилань містить у собі посилання на підручники, навчальні посібники та книги, які були використані під час виконання роботи. Посилання в тексті подаються у квадратних дужках. У дужках проставляють номер, під яким джерело значиться в переліку посилань.