

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”
ІНСТИТУТ СПЕЦІАЛЬНОГО ЗВ’ЯЗКУ ТА ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ

Козловський В.В., Кононова І.В., Павлов В.П.

Теорія електрозв’язку Основи теорії електронних комунікацій

Практикум

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітніми програмами
“Безпека державних інформаційних ресурсів”, “Спеціальні системи електронних
комунікацій”, спеціальностями: F5 “Кібербезпека та захист інформації”,
G5 “Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка”

Електронне мережеве навчальне видання

Київ
ІСЗЗІ КПІ ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО
2026

УДК 621.391
K59

Автори: *Козловський Валерій Вікторович*, д-р техн. наук, проф.
Кононова Ірина Віталіївна, канд. техн. наук, доц.
Павлов Віталій Павлович, канд. техн. наук, доц.

Рецензент *Могилевич Д.І.*, д-р т.н., проф., завідувач Спеціальної кафедри №3
ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний
редактор *Кононова Ірина Віталіївна*, канд. техн. наук, доцент

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 4 від 05.02.2026 р.)
за поданням вченої ради ІСЗЗІ
(протокол № 7 від 29.01.2026 р.)*

Козловський В.В

K59 Теорія електрозв'язку. Основи теорії електронних комунікацій [Електронний ресурс]: Навчальний посібник до практичних занять з освітніх компонентів “Теорія електрозв'язку” та “Основи теорії електронних комунікацій”: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітніми програмами “Безпека державних інформаційних ресурсів”, “Спеціальні системи електронних комунікацій”, спеціальностями: F5 “Кібербезпека та захист інформації”, G5 “Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка” / В.В Козловський, І.В. Кононова, В.П. Павлов. ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,25 Мбайт). – Київ: ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського 2025. – 61 с.

Навчальний посібник до практичних занять призначений для здобувачів, які вивчають освітні компоненти “Теорія електрозв'язку” та “Основи теорії електронних комунікацій”. Він складений відповідно до освітніх компонентів і призначений для використання на практичних заняттях і при самостійній роботі. Матеріал посібника розділений на 5 розділів: сигнали в каналах зв'язку, завади в каналах зв'язку, основи теорії інформації, основи теорії кодування, завадостійкість каналів зв'язку. Наприкінці посібника розміщений необхідний довідковий матеріал, а також відповіді на задачі, які вимагають розв'язання в числовій формі. Матеріали посібника також будуть корисними як у навчальній діяльності аспірантів і викладачів, так і в службовій діяльності спеціалістів Державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації України.

УДК 621.391

Реєстр. № НП 25/26-215. Обсяг 1,58 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© В.В. Козловський, І.В. Кононова, В.П. Павлов
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026

ЗМІСТ

Розділ 1. Сигнали в каналах зв'язку.....	5
Розділ 2. Завади в каналах зв'язку.....	16
Розділ 3. Основи теорії інформації.....	21
Розділ 4. Основи теорії кодування.....	27
Розділ 5. Завадостійкість каналів зв'язку.....	31
5.1. Завадостійкість каналів передачі дискретних повідомлень.....	31
5.2. Завадостійкість каналів передачі неперервних повідомлень.....	38
Відповіді на задачі.....	42
Додатки.....	44
Додаток 1.....	44
Додаток 2.....	46
Додаток 3.....	47
Додаток 4.....	48
Додаток 5.....	49
Рекомендована література.....	51

РОЗДІЛ 1. СИГНАЛИ В КАНАЛАХ ЗВ'ЯЗКУ

Основні параметри сигналів визначаються за їх часовими і спектральними поданнями. Спектри періодичних сигналів є дискретними (лінійчатими). Неперіодичні сигнали характеризуються неперервними (суцільними) спектрами.

Сигнал у вигляді періодичної послідовності відеоімпульсів прямокутної форми можна представити рядом Фур'є

$$c(t) = \frac{c_0}{q} + \frac{2c_0}{q} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left| \frac{\sin \frac{n\pi}{q}}{\frac{n\pi}{q}} \right| \cdot \cos n\Omega t,$$

де c_0 – амплітуда імпульсу;

q – скважність імпульсів;

$\Omega = 2nF$ – частота проходження імпульсів.

Ширина спектра такого сигналу визначається за формулою

$$\Delta F = nF,$$

де n – кількість складових спектра, які враховуються.

Ефективна (еквівалентна) ширина спектра випадкового телеграфного сигналу дорівнює

$$\Delta F_{\text{эф}} = \frac{1}{2\tau_i},$$

де τ_i – тривалість імпульсу сигналу.

Ширина спектра фототелеграфного сигналу визначається виразом

$$\Delta F = \frac{kl}{2\delta},$$

де k – кількість переданих рядків у секунду;

l – довжина рядка зображення (в мм);

δ – діаметр растр-елемента (в мм).

Відповідно до прийнятого в Україні стандарту телевізійний сигнал характеризується шириною спектра, обчисленою за формулою

$$\Delta F = \frac{4}{3} Z^2 h,$$

де $Z = 625$ – кількість рядків у кадрі,

$h = 25$ – кількість переданих кадрів за секунду.

Пік-фактор телефонного сигналу визначається за формулою

$$\Pi = \sqrt{\frac{P_{\text{макс}}}{P_{\text{сер}}}},$$

де $P_{\text{макс}}$ – максимальна потужність сигналу,

$P_{\text{сер}}$ – середня потужність сигналу.

Потужність шуму квантування при рівномірному квантуванні сигналу дорівнює

$$P_{\text{шкв}} = \frac{\delta^2}{12},$$

де δ – крок квантування.

Ширина спектра цифрового сигналу з ІКМ визначається виразом

$$\Delta F_{\text{ІКМ}} = 2N \cdot n \cdot F_{\text{макс}},$$

де N – кількість каналів;

n – розрядність коду;

$F_{\text{макс}}$ – максимальна частота спектра первинного сигналу.

Сигнал з амплітудною маніпуляцією може бути поданий рядом Фур'є

$$A_{\text{АМ}}(t) = \frac{a_0}{2} \cos \omega_0 t + \frac{a_0}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left| \frac{\sin \frac{n\pi}{2}}{\frac{n\pi}{2}} \right| \{ \cos(\omega_0 + n\Omega)t + \cos(\omega_0 - n\Omega)t \},$$

де a_0 – амплітуда несучого коливання;

n – номер складової спектра;

Ω – частота проходження імпульсів.

Ширина спектра сигналів з амплітудною і фазовою маніпуляцією обчислюється за формулою

$$\Delta f_{\text{AM}} = \Delta f_{\text{FM}} = 2nF,$$

де F – частота проходження імпульсів сигналу;

n – кількість врахованих складових у спектрі сигналу.

Сигнал з частотною маніпуляцією з розривом фази може бути поданий у вигляді суми спектрів двох сигналів з амплітудною маніпуляцією

$$A_{\text{ЧМ}}(t) = \frac{1}{2} a_0 \cos \omega_1 t + \frac{a_0}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(\omega_1 \pm n\Omega)t + \frac{1}{2} a_0 \cos \omega_2 t + \frac{a_0}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(\omega_2 \pm n\Omega)t.$$

При частотній маніпуляції ширина спектра сигналу визначається виразами

1) при формуванні сигналу з розривом фази:

$$\Delta f_{\text{ЧМ}} = \Delta f_p + 2nF;$$

2) при формуванні сигналу без розриву фази

$$\Delta f_{\text{ЧМ}} = 2F(1 + m_{\text{ЧМ}} + \sqrt{m_{\text{ЧМ}}}),$$

де Δf_p – рознос частот;

n – кількість врахованих складових спектра;

$m_{\text{ЧМ}} = \frac{\Delta f_d}{F}$ – індекс (коефіцієнт) частотної модуляції;

$\Delta f_d = \frac{1}{2} \Delta f_p$ – девіація частоти.

Сигнал з фазовою маніпуляцією визначається рядом Фур'є

$$A_{\text{ФМ}}(t) = a_0 \cos \frac{\Delta \varphi}{2} \cos \omega_0 t + \frac{2a_0}{\pi} \sin \frac{\Delta \varphi}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left| \sin \frac{n\pi}{2} \right| \cos(\omega_0 \pm n\Omega)t,$$

де $\Delta \varphi = |\varphi_1 - \varphi_2|$ – різниця фаз сигналів.

Сигнал з амплітудною модуляцією можна подати рядом Фур'є

$$A_{AM}(t) = a_0 \cos \omega_0 t + \frac{m_{AM} a_0}{2} \cos(\omega_0 + \Omega)t + \frac{m_{AM} a_0}{2} \cos(\omega_0 - \Omega)t,$$

де $m_{AM} = \frac{\Delta a}{a_0}$ – коефіцієнт амплітудної модуляції;

Δa – максимальне збільшення амплітуди несучого коливання в процесі модуляції;

a_0 – амплітуда немодульованого несінного коливання.

Ширина спектра сигналу з амплітудною модуляцією визначається за формулою

$$\Delta f_{AM} = 2F_{\text{макс}},$$

де $F_{\text{макс}}$ – максимальна частота спектра переданого первинного сигналу.

Сигнал з частотною модуляцією визначається виразом

$$A_{\text{ЧМ}}(t) = a_0 J_0(m_{\text{ЧМ}}) \cos \omega_0 t + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n a_0 J_n(m_{\text{ЧМ}}) \cos(\omega_0 - n\Omega)t + \\ + \sum_{n=1}^{\infty} a_0 J_n(m_{\text{ЧМ}}) \cos(\omega_0 + n\Omega)t,$$

де $J_n(m_{\text{ЧМ}})$ – функція Бесселя 1-го роду n -го порядку від аргументу $m_{\text{ЧМ}}$.

Ширина спектра сигналу з частотною модуляцією обчислюється за формулою Манаєва

$$\Delta f_{\text{ЧМ}} = 2F(1 + m_{\text{ЧМ}} + \sqrt{m_{\text{ЧМ}}}),$$

де $m_{\text{ЧМ}} = \frac{\Delta f_{\text{Д}}}{F_{\text{макс}}}$ – індекс (коефіцієнт) частотної модуляції.

Сигнали з імпульсними видами модуляції визначаються формулами

$$A_{\text{AIM}}(t) = a_0 \gamma (1 + m_{\text{AIM}} \cos \Omega t) \cos \omega_0 t + 2a_0 \gamma (1 + m_{\text{AIM}} \cos \Omega t) \times \\ \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \cdot n\pi\gamma}{n\pi\gamma} \cos n\Omega t \cdot \cos \omega_0 t;$$

$$A_{\text{ИМ}}(t) = a_0 \gamma [1 + m_{\tau} \cos \Omega t] \cos \omega_0 t + \\ 2a_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n\pi} \{n\pi\gamma [1 + m_{\tau} \cos \Omega t]\} \cos n\Omega t \cdot \cos \omega_0 t;$$

$$A_{\Phi\text{IM}} = a_0 \gamma [1 + \Delta t_{\text{макс}} \Omega \cos \Omega t] \cos \omega_0 t + \frac{2a_0}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sum_{m=0}^{\infty} J_m(n \Delta t_{\text{макс}} \Omega) \times \\ \times \sin[\pi \tau_i (n F_i \pm m F)] \cos(n \Omega_n \pm m \Omega) t \cos \omega_0 t,$$

де a_0 – амплітуда імпульсів;

γ – коефіцієнт заповнення;

m_{AIM}, m_{τ} – коефіцієнт модуляції сигналів відповідно з AIM і ШІМ;

$\Delta t_{\text{макс}}$ – девіація імпульсів при ФІМ;

F_i – частота проходження імпульсів;

$\Omega = 2\pi F$ – частота первинного сигналу;

ω_0 – частота несінного коливання;

τ_i – тривалість імпульсу.

Ширина спектра сигналів з імпульсними видами модуляції визначається за формулою (для радіоімпульсів)

$$\Delta f_{\text{АП}} = \Delta f_{\text{ШІМ}} = \Delta f_{\text{ФІМ}} = \frac{2}{\tau_i}.$$

ЗАДАЧІ

1.1. Розрахувати і побудувати спектри амплітуд (до п'ятої гармоніки включно) періодичної послідовності прямокутних відеоімпульсів позитивної полярності, якщо скважність імпульсів $q = 2$, амплітуда $c_0 = 120 \text{ В}$ і швидкість передачі $v_c = 50 \text{ Бод}$.

1.2. Розрахувати і побудувати спектри середньої потужності розглянутих сигналів (див. задачу 1.1).

1.3. Визначити ефективні смуги частот, які займають телеграфні сигнали прямокутної форми при швидкостях передачі 50, 150 і 1200 Бод.

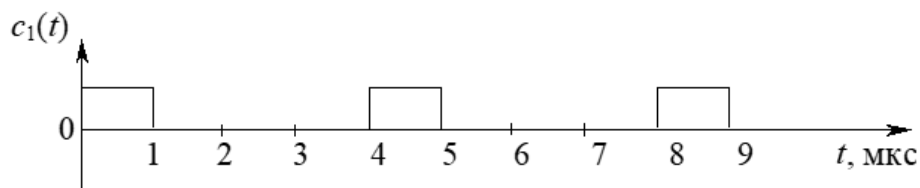
1.4. Визначити максимальну швидкість передачі телеграфних сигналів по кабелю з частотним діапазоном 0...15 кГц. Спектр сигналу обмежений третьою гармонікою включно.

1.5. Визначити тривалість елементарного імпульсу первинного телеграфного сигналу, призначеного для передачі простим кодом повідомлень з алфавітом $M = 32$ зі швидкістю 10 символів у секунду.

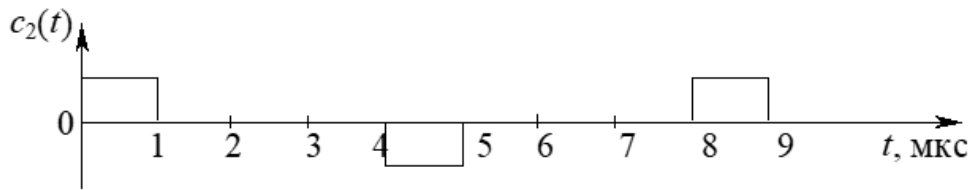
1.6. Визначити швидкість передачі символів повідомлення телеграфним апаратом з використанням коду МТК-2. Швидкість передачі сигналів дорівнює $v = 50 \text{ Бод}$.

1.7. Розрахувати і зобразити графіки кореляційної функції і спектральної щільності потужності одиночного відеоімпульсу прямокутної форми, якщо амплітуда імпульсу $c_0 = 1 \text{ В}$, тривалість імпульсу $\tau_i = 2 \text{ мс}$.

1.8. Розрахувати і зобразити графіки спектрів періодичних сигналів, які зображені на 1.1 (а, б).



а)



б)

Рис. 1. Частота першої гармоніки періодичних сигналів

1.9. Визначити частоту першої гармоніки періодичних сигналів, поданих на рис. 1.1 (а, б).

1.10. Визначити смугу пропускання каналу, необхідну для передачі графічної інформації за допомогою фототелеграфного апарата, якщо передача здійснюється зі швидкістю $k = 480$ рядків у хвилину, довжина рядка переданого зображення $l = 200$ мм, розмір растр-елемента дорівнює $\delta = 0,265$ мм. Спектр сигналу обмежується частотою проходження імпульсів.

1.11. Визначити смугу пропускання каналу, необхідну для передачі телевізійного сигналу, що відповідає українському стандарту телебачення, якщо: кількість рядків у кадрі $Z = 625$, частота кадрів $h = 25$.

1.12. Визначити ширину спектра групового сигналу 30-ти каналної системи передачі з ІКМ, якщо динамічний діапазон переданих мовних сигналів дорівнює 6 дБ, а допустима потужність шуму квантування $P_{\text{ш кв}} \leq 0,2 \text{ мВт}$.

1.13. Визначити швидкість передачі групового сигналу 32-каналної ЦСП з імпульсно-кодовою модуляцією в, якій відношення сигнал/шум квантування $h_{\text{кв}}^2 = 5 \cdot 10^3$. Пік-фактор мовного сигналу $\Pi = 30$ дБ.

1.14. Визначити необхідний ступінь компресії $\Pi_{\text{ком}}$ аналогового сигналу на вході стандартної первинної ЦСП з ІКМ, якщо відношення

сигнал/шум квантування $h_{\text{кв}}^2 = 5 \cdot 10^3$, пік-фактор мовного сигналу $\Pi = 30$ дБ, швидкість передачі $v_c = 2048 \cdot 10^3$ біт/с.

1.15. Визначити допустиму швидкість зміни сигналу на вході дельта-кодека, якщо крок квантування дорівнює 50 мВ, а швидкість передачі сигналу на виході кодера дорівнює 48000 дв. од./с.

1.16. Розрахувати потужність шуму квантування в каналі з ІКМ при передачі мовних сигналів з динамічним діапазоном 6 дБ семирозрядним кодом.

1.17. Визначити тактову частоту сигналу на виході дельта-кодека при максимально можливій швидкості зміни первинного сигналу $\frac{dc(t)}{dt} = 2400$ В/с. Крок квантування є постійним і дорівнює 50 мВ.

1.18. Визначити розрядність коду системи передачі з ІКМ при передачі мовних сигналів з динамічним діапазоном 40дБ, якщо допустима потужність шуму квантування дорівнює 0,05 Вт.

1.19. Повідомлення передається кодом Морзе зі швидкістю 80 символів за хвилину з використанням амплітудної маніпуляції.

Визначити необхідну смугу пропускання приймача на вході демодулятора, якщо середня тривалість кодової комбінації дорівнює 7 елементарним сигналам. Тривалість кожного сигналу дорівнює тривалості “точки”.

1.20. У радіоприймальному пристрої смуга пропускання тракту приймання сигналів з частотною маніпуляцією з розносом частот 125 Гц при швидкості передачі 100 Бод дорівнює 300 Гц.

Визначити порядкові номери гармонік, які будуть потрапляти в смугу пропускання тракту, якщо сигнал формується з розривом фази. Зобразити спектр сигналу на вході демодулятора.

1.21. Розрахувати параметри спектрів амплітуд в контрольних точках формувача (КТ-1, КТ-2) частотно-маніпульованого сигналу

(рис. 1.2), якщо первинний сигнал є періодичною послідовністю відеоімпульсів зі скважністю $q = 2$ і швидкістю передачі $v_c = 60$ Бод.

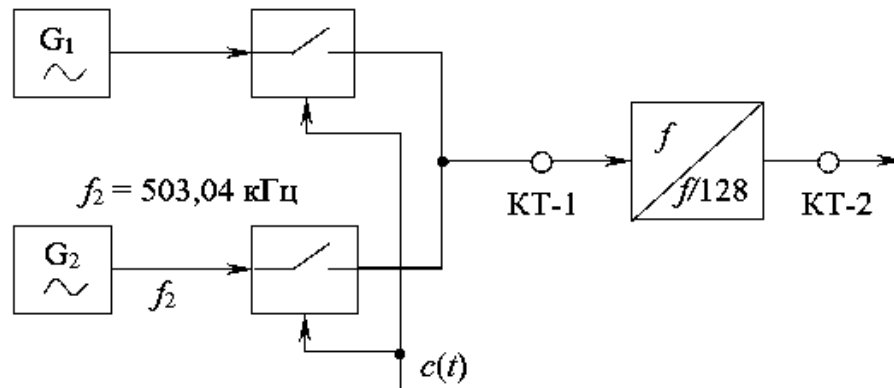


Рис. 1.2. Контрольні точки формувача (КТ-1, КТ-2) частотно-маніпульованого сигналу

1.22. Визначити максимальне значення швидкості передачі сигналів з ВФМ стандартним каналом тональної частоти.

1.23. Визначити ефективну смугу пропускання приймального тракту сигналів з ВФМ при передачі сигналів зі швидкостями 200 і 1200 Бод.

1.24. Розрахувати ширину спектра сигналу на виході передавача, який працює в режимі F1-250 (з розривом фази), якщо джерелом первинного сигналу є телеграфний апарат, що працює зі швидкістю 50 Бод.

1.25. Визначити ширину спектра лінійного сигналу системи передачі з частотним розділенням каналів при формуванні ЧМ сигналів без розриву фази з дев'ятією частоти 60 Гц при швидкості передачі сигналів 100 Бод. Кількість каналів $N = 6$.

1.26. Визначити максимально можливу швидкість передачі сигналів з амплітудною маніпуляцією, якщо смуга пропускання приймального тракту дорівнює 450 Гц.

1.27. Розрахувати смугу пропускання приймального тракту сигналів з подвійною частотною маніпуляцією з розносом частот 250 Гц при швидкості передачі 100 Бод.

1.28. Розрахувати і зобразити графіки спектрів амплітуд сигналів з ВФМ при передачі періодичної послідовності різнополяризованих імпульсів зі швидкістю 1200 Бод для значень девіації фази $\pi/2$ і $\pi/4$. Амплітуда несінного коливання дорівнює 2В.

1.29. Розрахувати і побудувати графік спектральної щільності середньої потужності сигналу з фазовою маніпуляцією, якщо кореляційна функція сигналу $R(\tau) = \frac{a_0}{2} \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) \cos \omega_0 \tau$, амплітуда сигналу дорівнює 2В, а тривалість імпульсу сигналу 10 мс.

1.30. Розрахувати ширину спектрів сигналів з фазовою і відносною фазовою маніпуляцією. Первинний сигнал є періодичною послідовністю прямокутних різнополяризованих імпульсів, переданих зі швидкістю 1200 Бод.

1.31. Визначити інтервал кореляції й ефективну ширину спектра сигналу з фазовою маніпуляцією, що має кореляційну функцію

$$R(\tau) = \frac{a_0}{2} \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) \cos \omega_0 \tau.$$

1.32. Спектр амплітудно-модульованого сигналу зображений на рис. 1.3. Знайти коефіцієнт амплітудної модуляції і середню потужність сигналу на навантаженні 1 Ом.

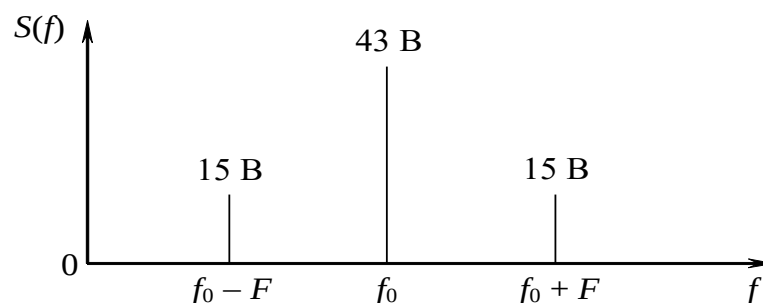


Рис. 1.3. Спектр амплітудно-модульованого сигналу

1.33. Визначити пік-фактор сигналу з амплітудною модуляцією, спектральна діаграма якого подана на рис. 1.3.

1.34. Визначити максимальне значення індексу частотної модуляції, який можна використовувати при передачі мовних повідомлень, якщо смуга пропускання приймального тракту дорівнює: а) 20 кГц; б) 34 кГц; в) 50 кГц.

1.35. Обчислити смугу спектра частотно-модульованого сигналу на виході передавача при передачі мовних повідомлень, якщо девіація частоти дорівнює 5 кГц.

1.36. Визначити девіацію частоти частотно-модульованого сигналу, при відомій смузі пропускання приймального тракту, яка дорівнює 154 кГц, а переданий сигнал є лінійним шестиканальним сигналом зі спектром 0,3...32 кГц.

1.37. Визначити смугу пропускання приймального тракту ЧМ сигналу при передачі сигналу трьохканальної групи зі спектром 0,3...18 кГц, якщо девіація частоти дорівнює 30 кГц.

1.38. Значення частоти несінного коливання $f_0 = 50$ МГц. Знайти межі, у яких змінюється миттєва частота сигналу, якщо частота первинного сигналу $F = 1$ кГц, а індекс частотної модуляції дорівнює 5.

1.39. Зобразити спектральну діаграму ЧМ сигналу на виході передавача, який працює на частоті 30 МГц, якщо амплітуда сигналу 10 В, девіація частоти 5 кГц, частота первинного сигналу 1 кГц.

1.40. Записати аналітичний вираз частотно-модульованого коливання і його миттєвої частоти на виході передавача, якщо частота настроювання радіостанції $f_0 = 20$ МГц, амплітуда несінного коливання $a_0 = 100$ В, початкова фаза коливання високої частоти 60° , частота первинного сигналу $F = 800$ Гц і початкова фаза 90° , індекс модуляції дорівнює 3.

1.41. Первинний гармонічний сигнал з частотою $F = 4$ кГц передається методом ЧМ з індексом $m_{\text{ЧМ}} = 4$. Як зміниться ширина

спектру ЧМ сигналу, якщо частоту первинного сигналу F зменшити в два рази при незмінній девіації частоти?

1.42. Здійснити порівняльну оцінку сигналів з частотною і фазовою модуляцією за величиною максимальної і мінімальної ширини спектра при передачі мовного сигналу. Девіація частоти дорівнює 75 кГц, значення індексу фазової модуляції дорівнює максимальному значенню індексу частотної модуляції $m_{\text{ФМ}} = m_{\text{ЧМmax}}$.

1.43. Визначити ширину спектра сигналу на виході передавача, якщо передача мовних повідомлень здійснюється сигналами ФІМ-АМ зі скважністю імпульсів $q = 416$.

1.44. Визначити ширину спектра сигналу на виході передавача, якщо передача мовних повідомлень здійснюється сигналами ФІМ-ЧМ зі шпаруватістю імпульсів 250, зсув частоти дорівнює 4 МГц, тривалість тактового (канального) інтервалу 5,2 мкс. Зобразити спектр цього сигналу.

1.45. Розрахувати кількість каналів ТЧ, яку можна одержати в системі передача з ФІМ, якщо девіація імпульсів дорівнює $\Delta t_{\text{макс}} = \pm 1$ мкс, шпаруватість імпульсів $q = 416$, а тривалість захисного інтервалу між канальними імпульсами $\Delta t_{\text{зах}} = 2,6$ мкс.

1.46. Знайти відношення амплітуд переданих (первинних) сигналів у спектрах сигналів з ШІМ і ФІМ, якщо $\Delta \tau_{\text{ШІМ}} = \Delta t_{\text{макс}} = 1$ мкс, $\tau_i = 0,3$ мкс, частота первинного сигналу $F = 1$ кГц.

1.47. Порівняти амплітудні значення корисного сигналу в спектрах АІМ, ШІМ і ФІМ сигналів при однотональній модуляції з $F = 4$ кГц. При цьому $m_{\text{АІМ}} = 0,5$, $\tau_i = 0,3$ мкс, $\Delta \tau_{\text{макс ШІМ}} = \Delta t_{\text{макс ФІМ}} = 1,5$ мкс.

1.48. Розрахувати допустимі швидкості передачі сигналів F_6 з розносами частот 200 Гц, 500 Гц і 1000 Гц, якщо в приймачі смуги пропускання приймальних трактів цих сигналів (враховувати перші три гармоніки спектрів) дорівнюють відповідно 1200 Гц, 2200 Гц і 4500 Гц.

1.49. Визначити ширину спектрів сигналів з частотною, подвійною частотною маніпуляцією і 2-х канальною ЧМ-ЧРК, якщо швидкість передачі $v_c = 50$ Бод, величина розносу частот $\Delta f_p = 250$ Гц, величина захисного інтервалу $\Delta f_{зах} = 200$ Гц. Порівняти спектри цих сигналів (при ЧМ з розривом фази).

1.50. Визначити максимальну швидкість передачі інформації каналом тональної частоти, якщо використовується односмугова передача сигналів з відносною фазовою маніпуляцією в сполученні з дворівневою амплітудною маніпуляцією.

1.51. Мовні сигнали в асинхронно-адресній системі передачі (ААСП) передаються за допомогою частотно-часової матриці, один з варіантів якої зображений на рис. 1.4. Визначити максимально можливу кількість абонентів ААСП.

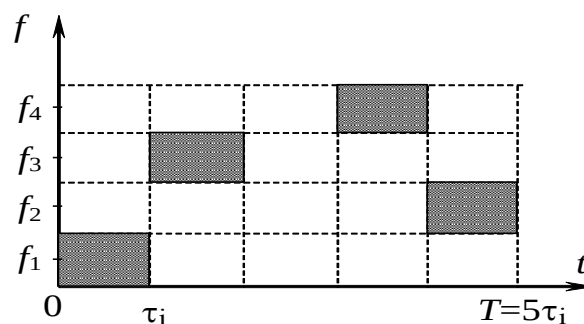


Рис. 1.4. Частотно-часова матриця

1.52. Розрахувати тривалість імпульсу і ширину спектра сигналу (див. задачу 1.52), якщо вид модуляції – ФІМ-ВФМ, девіація сигналу ФІМ $\Delta t_{\max} = 10\tau_i$, величина захисного інтервалу $\Delta t_{зах} = 15\tau_i$.

1.53. Розрахувати, які значення може приймати амплітуда і початкова фаза сигналу на виході модулятора сигналів КАМ-16, якщо амплітуди квадратурних складових дорівнюють $a_c = a_s = \pm 1$ В, ± 3 В.

РОЗДІЛ 2. ЗАВАДИ В КАНАЛАХ ЗВ'ЯЗКУ

У каналі зв'язку, окрім корисного сигналу, завжди наявні сторонні випадкові процеси різного походження, які прийнято називати завадами. Їхня наявність зумовлює неоднозначність у процесі відновлення повідомлення. Накладаючись на сигнал, завада спотворює його, що призводить до втрати або руйнації переданої інформації. За електричними та статистичними характеристиками адитивні завади поділяють на флуктуаційні, імпульсні (локалізовані в часі) та вузькосмугові (локалізовані у спектрі).

В наступному виді можна записати флуктуаційну заваду (ФЗ)

$$B(t) = b(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \beta(t)),$$

де $B(t)$ – миттєве значення завади,

$\omega_0 = 2\pi f_0$ – кутова частота настройки загального тракту приймача,

$b(t)$, $\beta(t)$ – відповідно обвідна і початкова фаза завади.

Миттєві значення ФЗ розподілені за гауссівським законом

$$p(B) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{B^2}{2\sigma^2}},$$

де σ^2 – дисперсія завади.

Обвідна ФЗ має розподіл за законом Релея

$$p(b) = \frac{b}{\sigma^2} e^{-\frac{b^2}{2\sigma^2}}.$$

Розподіл початкової фази ФЗ відповідає рівномірному закону на вибраному інтервалі $0 \dots 2\pi$

$$p(\beta) = \frac{1}{2\pi}.$$

Середня потужність ФЗ (на навантаженні 1 Ом) обчислюється за формулою

$$P_{\text{ср}} = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) df,$$

де $G(f)$ – спектральна щільність середньої потужності завади.

Імпульсна завада на виході одиночного коливального контуру визначається виразом

$$B(t) = 4S_0 K_0 \Delta f_{\text{еф}} e^{-2\Delta f_{\text{еф}} t} \cos(2\pi f_0 t + \beta_0).$$

Тривалість завади визначається виразом

$$\Delta t_3 = \ln \frac{4S_0 K_0 \Delta f_{\text{еф}}}{a_0} \cdot \frac{1}{2\Delta f_{\text{еф}}}.$$

На виході фільтра з прямокутною АЧХ

$$B(t) = 2S_0 K_0 \Delta f \left| \frac{\sin \pi \Delta f t}{\pi \Delta f t} \right| \cos(2\pi f_0 t + \beta_0),$$

де S_0 – спектральна щільність амплітуд імпульсу збудження;

K_0 – коефіцієнт передачі тракту;

Δf – смуга пропускання системи.

В інженерних розрахунках сигнали і завади часто розглядаються як випадкові процеси.

Кореляційна функція випадкового процесу $x(t)$ визначається виразом

$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^{T-\tau} x(t)x(t+\tau) dt,$$

де T – інтервал спостереження.

Інтервал кореляції обчислюється за формулою

$$\Delta \tau_k = 2 \int_0^T \frac{R(\tau)}{R(0)} dt.$$

Інтервал кореляції й ефективна ширина спектра випадкового процесу пов'язані співвідношенням:

– для первинних сигналів

$$\Delta F_{\text{еф}} = \frac{1}{2\Delta\tau_{\text{к}}},$$

— для модульованих сигналів

$$\Delta f_{\text{еф}} = \frac{1}{\Delta\tau_{\text{к}}}.$$

Кореляційна функція і спектральна щільність середньої потужності випадкового процесу пов'язані парою перетворень Фур'є

$$R(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) \cos \omega \tau d\omega,$$

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) \cos \omega \tau d\tau.$$

ЗАДАЧІ

2.1. Розрахувати середню потужність шуму на виході лінійного підсилювача з одиночним коливальним контуром у навантаженні, настроєним на частоту $f_0 = 128$ кГц, який має добротність $Q = 50$ і коефіцієнт підсилення $K_0 = 10$, якщо спектральна щільність середньої потужності шуму на виході підсилювача $G_0 = 2 \cdot 10^{-9}$ Вт/Гц.

2.2. Розрахувати і побудувати графік кореляційної функції гауссівського шуму на виході ідеального смугового фільтра з прямокутною АЧХ, обмеженою частотами f_1 і f_2 , якщо коефіцієнт передачі $K(f) = K(f_0) = 1$. Спектральна щільність потужності шуму на вході фільтра дорівнює G_0 .

2.3. Визначити і побудувати графік щільності розподілу миттєвих значень завади $p(y)$ на виході двостороннього безінерційного підсилювача-обмежувача з характеристикою

$$y = f(x) = \begin{cases} kx, & \text{при } -a/k < x < a/k; \\ a, & \text{при } x \geq a/k; \\ -a, & \text{при } x \leq -a/k. \end{cases}$$

На вхід підсилювача-обмежувача надходить гауссівський шум з математичним очікуванням $m_x = a/2k$ і дисперсією σ_x^2 .

2.4. Визначити ймовірність спрацювання тригера демодулятора, схема якого подана на рис. 2.1.

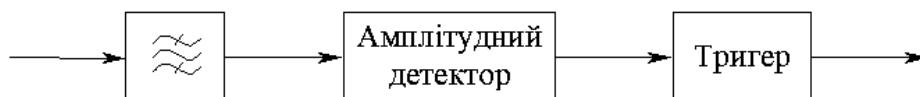


Рис. 2.1. Схема тригера демодулятора

За умови якщо ефективна смуга пропускання фільтра $\Delta f = 20$ кГц, гранична напруга спрацювання тригера $U_{\text{пор}} = 2$ В, спектральна

щільність потужності шуму на виході фільтра $G_0 = 0,5 \cdot 10^{-4}$ Вт/Гц. Загасання фільтра в смузі пропускання не враховувати.

2.5. Розрахувати математичне очікування і дисперсію початкової фази флуктуаційної завади, яка рівномірно розподілена в межах $0 \dots 2\pi$.

2.6. Визначити ймовірність того, що амплітуда флуктуаційної завади з дисперсією 4 В^2 перевищить амплітуду сигналу $a_0 = 10 \text{ В}$ на вході приймача. Амплітуда флуктуаційної завади розподілена за законом Релея.

2.7. Напряга шуму квантування розподілена за рівномірним законом в інтервалі $\delta/2 \leq \varepsilon \leq \delta/2$ (де δ – крок квантування). Розрахувати значення потужності шуму квантування, якщо $\delta = 0,02 \text{ В}$, де ε – похибка квантування.

2.8. На вході підсилювача проміжної частоти приймача з ефективною смугою пропускання $\Delta f_{\text{эф}} = 8 \text{ кГц}$ діє «білий» шум із спектральною щільністю середньої потужності $G_0 = 10^{-10} \text{ Вт/Гц}$. Визначити середню потужність завади на виході підсилювача, якщо його коефіцієнт підсилення $K_0 = 2 \cdot 10^3$.

2.9. На вхід безінерційного нелінійного квадратичного елемента з характеристикою $y = ax^2$ надходить гауссівський шум з нульовим середнім значенням і дисперсією σ^2 . Знайти вираз для щільності розподілу миттєвих значень шуму на виході цього елемента.

2.10. Знайти моду (найбільш ймовірне значення) обвідної і середнє значення обвідної випадкового процесу на виході тракту, який має ефективну смугу пропускання $\Delta f_{\text{эф}} = 8 \text{ кГц}$ і коефіцієнт передачі $K_0 = 10$. Спектральна щільність середньої потужності гауссівського шуму на вході тракту дорівнює $G_0 = 10^{-5} \text{ Вт/Гц}$.

2.11. На вхід стандартного телефонного каналу надходить шум з рівномірною спектральною щільністю $G_0 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/Гц}$. Розрахувати середню потужність шуму на виході цього каналу.

2.12. Визначити смугу пропускання одиночного коливального контуру на рівні 0,7, якщо амплітуда імпульсної завади на його виході дорівнює $b_{\max} = 0,25$ В, а спектральна щільність амплітуд імпульсу збудження дорівнює $S_0 = 10^{-4}$ В/Гц. Коефіцієнт передачі контура прийняти рівним $K_0 = 1$.

2.13. Визначити максимальне значення обвідної імпульсної завади на виході ідеального смугового фільтра зі смугою пропускання $\Delta f = 20$ кГц, якщо спектральна щільність імпульсу збудження дорівнює $S_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ В/Гц.

2.14. Визначити тривалість імпульсної завади (на рівні $0,25b_{\max}$) на виході одиночного коливального контуру з частотою настроювання $f_0 = 128$ кГц і добротністю $Q=75$.

2.15. На вхід резонансного підсилювача з одиночним коливальним контуром у навантаженні надходить сигнал $A(t) = 0,1 \cos \omega_0 t$, $t \in [0, \tau_i]$, і імпульсна завада з рівномірною спектральною щільністю амплітуд $S_0 = 10^{-4}$ В/Гц. Визначити, яка частина тривалості сигналу подавлюється завадою, якщо смуга пропускання контуру $\Delta f_{0,7} = 2$ кГц, а тривалість сигналу $\tau_i = 20$ мс.

2.16. Показати, що функція кореляції білого шуму є дельта-функцією, а його дисперсія $\sigma^2 = \infty$.

2.17. Визначити граничну напругу спрацьовування тригера в схемі, зображеній на рис. 2.1, коли на його виході ймовірності появи імпульсів, що відповідають логічній “одиниці” і “нулю”, будуть однаковими. Ефективна ширина смуги пропускання фільтра дорівнює 20 кГц, спектральна щільність потужності гауссівського шуму на вході фільтра дорівнює $0,5 \cdot 10^{-4}$ Вт/Гц, коефіцієнт передачі фільтра в смузі пропускання $K_0 = 0,8$.

2.18. Визначити ефективну ширину смуги пропускання фільтра нижніх частот, який використовується для приймання сигналів, що мають кореляційну функцію $R(\tau) = 2(1 - 0,2 \cdot 10^3 \tau)$.

2.19. Багатопроменевий канал передачі характеризується часом багатопроменевості $\Delta T_L = 0,4 \text{ мкс}$ і доплерівською зоною $\Delta F_D = 10 \text{ Гц}$. Каналом здійснюється передача цифрових сигналів з ВФМ. Визначити діапазон швидкостей передачі цифрових сигналів, при яких завмирання сигналів можна вважати загальними.

РОЗДІЛ 3. ОСНОВИ ТЕОРІЇ ІНФОРМАЦІЇ

Поняття “інформація” застосовують досить часто. Інформація в будь-якому вигляді є об'єктом збереження, передачі та перетворення. В теорії електрозв'язку в першу чергу цікавляться властивостями інформації з точки зору її передачі від відправника до одержувача. Під інформацією розуміють відомості про події, процеси та предмети, що існують у навколишньому світі.

Передавана інформація міститься в повідомленні. Множина символів (знаків), з яких будуються повідомлення, називають алфавітом. У процесі передачі в системі зв'язку повідомлення може зазнавати численні перетворення, які істотно змінюють його електричне представлення і фізичні характеристики. Об'єктом передачі в системі зв'язку є така інформація про повідомлення, яка дозволяє відновити його з необхідною точністю. Саме ця інформація повинна залишатися незмінною при всіх перетвореннях.

У процесі передачі каналами електрозв'язку сигнали піддаються численним перетворенням, які істотно змінюють їх фізичні характеристики. При цьому втрачається частина переданої каналом інформації. Для порівняння між собою різноманітних джерел повідомлень, каналів електрозв'язку і систем передачі вводиться кількісна міра інформації.

Загальне кількість повідомлень, що не повторюються, яка може бути складена з m алфавіту шляхом комбінування по n символів у повідомленні, дорівнює

$$M = m^n.$$

Величина, яка визначає середню кількість інформації, що міститься в одному символі повідомлення, називається *ентропією* H .

У тому випадку, якщо джерело повідомлення видає рівноймовірні і статистично незалежні символи, маємо

$$H = \log_n m = \log \frac{1}{P} = -\log P,$$

де P – ймовірність появи символів.

Підстава логарифма визначає лише зручність обчислення. У разі оцінки ентропії:

а) у двійкових одиницях

$$H = \log_2 m \text{ біт/символ};$$

б) у десяткових одиницях

$$H = \lg m \text{ діт/символ};$$

де $\log_2 m = 3,32 \lg m$, $1 \text{ біт} \approx 0,3 \text{ діт}$;

в) у натуральних одиницях

$$H = \ln m \text{ нат/символ},$$

де $\log_2 = 1,443 \ln$, $1 \text{ біт} \approx 0,693 \text{ нат}$.

Один біт інформації містить один символ найпростішого, двійкового повідомлення з рівноймовірними символами.

Для повідомлень з нерівноймовірними і незалежними символами:

$$H = -\sum_{i=1}^m P_i \log P_i.$$

Для повідомлень з нерівноймовірними і залежними символами:

$$H = -\sum_{j=1}^m p_j \sum_{i=1}^m p(i/j) \log p(i/j),$$

де $P(i/j)$ – умовна ймовірність, тобто ймовірність i -го символу за умови, що перед ним був j -й символ.

При розв'язанні задач, у яких ентропія обчислюється як сума добутків ймовірностей на їх логарифм, ймовірності завжди повинні подавати повну групу подій, незалежно від того, є вони умовними або безумовними ймовірностями.

Кількість інформації в повідомленні з n символів дорівнює:

$$I = nH.$$

Для оцінки інформаційних властивостей неперервних повідомлень використовується диференціальна ентропія, яка залежить від функції щільності ймовірності сигналу

$$H(x) = - \int_{-\infty}^{\infty} p(x) \log p(x) dx.$$

Спільна ентропія $H(x, y)$ двох джерел інформації з ентропією $H(x)$ і $H(y)$ дорівнює:

а) для незалежних джерел

$$H(x, y) = H(x) + H(y),$$

б) для залежних джерел

$$H(x, y) = H(x) + H(y/x)$$

або

$$H(x, y) = H(y) + H(x/y),$$

де $H(y/x)$ і $H(x/y)$ – умовні ентропії джерел.

Швидкість інформаційного потоку визначається кількістю інформації, переданої за одиницю часу. *Пропускною здатністю* каналу зв'язку називають його максимально можливу швидкість передачі інформації

$$C = \frac{I_{\text{макс}}}{\tau_i} \text{ біт/с},$$

де τ_i – тривалість передачі одного символу.

Не слід плутати швидкість передачі інформації зі швидкістю передачі сигналів (символ/с)

$$v_c = \frac{1}{\tau_i} \text{ символ/с}.$$

Пропускна здатність двійкового симетричного каналу, у якому сигнали передаються з ймовірністю помилки $P_{\text{пом}}$, дорівнює:

$$C = v_c (1 + P_{\text{пом}} \log P_{\text{пом}} + (1 - P_{\text{пом}}) \log(1 - P_{\text{пом}})).$$

При передачі неперервних повідомлень в умовах дії білого гауссівського шуму пропускна здатність каналу дорівнює:

$$C = \Delta F \log \left(1 + \frac{P_c}{P_z} \right),$$

де ΔF – смуга пропускання каналу;

P_c і P_z – середні потужності сигналу і завади відповідно.

Наявність ймовірнісних зв'язків між символами повідомлення і їх нерівноймовірність є причиною прояву надлишковості повідомлення.

Надлишковістю повідомлення з обсягом алфавіту m називається величина χ (хи), що показує, яка частина максимально можливої при цьому алфавіті ентропії не використовується

$$\chi = \frac{H_{\max} - H}{H_{\max}} = 1 - \frac{H}{\log m}; \quad 0 \leq \chi \leq 1.$$

Тексти і мовлення різними мовами мають велику надлишковість, тому що не всі можливі комбінації букв алфавіту використовуються для складання слів і не всі комбінації слів мають значення.

ЗАДАЧІ

3.1. Визначити обсяг алфавіту повідомлень у таких системах передача інформації: керування рухом за допомогою світлофора, телеграфна робота датчиком (ключем) коду Морзе, друкарство українською (російською, англійською) мовою.

3.2. Визначити, яку кількість інформації в середньому одержує людина, яка визначає час народження свого співрозмовника, якщо той повідомляє йому місяць, у якому він народився.

3.3. У якому співвідношенні знаходяться відомі одиниці кількості інформації: біт, нат, діт?

3.4. На виході одного трійкового джерела зафіксоване типове повідомлення 021201121120220, на виході другого – 011200221210100. Елемент повідомлення якого джерела несе в середньому більшу кількість інформації?

3.5. Визначити середню кількість інформації, що міститься в типовому повідомленні: 01001000110001.

3.6. Інформація передається за допомогою частотно-модульованого сигналу, при цьому його миттєва частота змінюється в межах від 20 кГц до 60 кГц із рівною ймовірністю. Визначити ентропію частоти, якщо точність виміру частоти дорівнює 2 кГц.

3.7. Радіостанція може працювати на частоті f_1 (подія A_1) або частоті f_2 (подія A_2); з частотною (подія B_1) або односмуговою модуляцією (подія B_2). Ймовірності сукупних подій мають наступні значення: $P(A_1/B_1) = P(A_1/B_2) = 0,15$; $P(A_2/B_1) = 0,05$; $P(A_2/B_2) = 0,1$. Визначити кількість отриманої інформації, якщо стала відомою частота роботи станції.

3.8. Двійкове джерело з рівноймовірними символами має продуктивність 1000 біт/с. При передачі каналом один із переданих 100 символів спотворюється. Визначити швидкість передачі інформації.

3.9. Пристрій виробляє в середньому біля 40 шестибуквених слів за хвилину. Визначте продуктивність джерела повідомлення, вважаючи всі букви рівноймовірними і статистично незалежними.

3.10. Розрахувати максимально можливу швидкість передачі інформації каналом, якщо його смуга пропускання дорівнює 10 кГц, потужність корисного сигналу 1 мВт, а завадою є тепловий шум приймача, який має температуру 300 С і $R_{ш} = 10$ кОм.

3.11. Встановити максимально допустиму швидкість передачі інформації каналом зв'язку, якщо смуга пропускання $\Delta F = 100$ кГц, а відношення сигнал/завада дорівнює 10. Як зміниться пропускна здатність каналу, якщо збільшити ширину смуги пропускання в 10 разів.

3.12. Каналом зі смугою пропускання 100 кГц, у якому діє завада типу «білий шум» зі спектральною щільністю потужності $G_0 = 1,6 \cdot 10^{-3}$ Вт/Гц, методом ФІМ передається сигнал, який має максимальну граничну частоту спектра $F_{\text{в}} = 10$ кГц і потужність $P_{\text{с}} = 14$ Вт. Чи можлива передача такого сигналу заданим каналом зв'язку? При розрахунках виходити з умови, що один відлік ФІМ сигналу несе 1 біт інформації.

3.13. Телевізійне зображення має 500 рядків, кожен з яких містить 200 елементів з 8 рівноймовірними градаціями яскравості. При передачі зображення каналом зв'язку з флуктуаційною завадою, яка має спектральну щільність потужності $G_0 = 8 \cdot 10^{-18}$ Вт/кГц, використовується смуга частот $\Delta F = 1$ кГц. Час передачі 1 година. Визначити необхідну мінімальну потужність сигналу, якщо передача інформації здійснюється зі швидкістю, яка дорівнює пропускній здатності каналу.

3.14. Символи повідомлення передаються з використанням коду МТК-2 зі швидкістю 50 Бод. Під впливом завад з кожних 100 переданих символів один спотворюється. Визначити пропускну здатність каналу зв'язку.

3.15. Два однотипних передавача попередньо настроєні на десять фіксованих частот. Яка кількість інформації міститься в повідомленні про те, що при першому ж довільному виборі частоти обома станціями кореспонденти ввійдуть у зв'язок?

3.16. Дві радіостанції, використовуючи ефект розсіювання ультракоротких хвиль метеорними слідами, одночасно ведуть роботу на одного кореспондента. Ймовірність проходження сигналів першої станції дорівнює 0,7, другої станції – 0,8. Яка кількість інформації міститься в повідомленні про те, що при одночасній роботі обох радіостанцій сигнал буде прийнятий?

3.17. Дискретні повідомлення передаються зі швидкістю 1200 дв.од./с. Відношення енергії сигналу до спектральної щільності середньої потужності шуму в каналі $Q^2 = 10$. Визначити пропускну здатність каналу зв'язку при використанні частотної і відносної фазової маніпуляції (приймання сигналів – некогерентне).

3.18. Зі 100 фіксованих частот для роботи радіостанції виділено 10. Відомо, що на п'ятих фіксованих частотах працюють передавачі завад. Яка кількість інформації міститься в повідомленні про те, що з 10 виділених частот дві уражені завадами?

3.19. Телефонний номер складається з п'ятих цифр. Яка кількість інформації міститься в повідомленні про те, що виділений номер закінчується цифрами 26?

3.20. На два приймачі з рознесеними в просторі антенами відбувається приймання сигналів. Ймовірність правильного приймання на перший приймач дорівнює 0,8, на другий – 0,9. Визначити кількість інформації, яка міститься в повідомленні про правильне приймання сигналу.

3.21. Апаратура складається з 32 рівноцінних за надійністю блоків. Визначити, яку кількість інформації одержує обслуговуючий персонал при виходу з ладу одного блока (двох блоків).

3.22. Каналом зв'язку передаються повідомлення за допомогою коду МТК-2. Ймовірність спотворення одного символу в кодовій комбінації дорівнює 0,01. Спотворення символів незалежні. Яка кількість інформації міститься в повідомленні про те, що інформація прийнята правильно (що спотворений один символ)?

3.23. Радист здійснює три виклики до кореспондента. Ймовірність прийняття першого виклику становить 0,2, другого – 0,3, третього – 0,4. Прийняті повідомлення незалежні. Визначити кількість інформації в повідомленні про те, що виклик прийнятий кореспондентом.

3.24. Радіорелейна лінія зв'язку має 8 проміжних кінцевих станцій. Ймовірність виходу з ладу кожної станції дорівнює 0,2. Яка кількість інформації міститься в повідомленні про те, що лінія справна?

3.25. Відповідно до попередніх підрахунків ймовірність символу в каналі зв'язку дорівнює 0,01. Один експеримент підтвердив ці дані. У ході другого експерименту отримана ймовірність спотворення 0,02. Яка кількість інформації отримана після першого і другого експериментів?

3.26. Каналом зв'язку передається одна з двох кодових комбінацій 11111 або 00000. Априорні ймовірності передачі цих коливань відповідно дорівнюють 0,7 і 0,3. Через наявність завад ймовірність спотворення кожного з символів (1 і 0) дорівнює 0,6. Яка невизначеність залишається у одержувача після приймання кодової комбінації 10110?

3.27. Визначити кількість інформації, яка міститься у виразі “передатна функція узгодженого фільтра”.

РОЗДІЛ 4. ОСНОВИ ТЕОРІЇ КОДУВАННЯ

Повідомлення при передаванні каналами електров'язку кодують. Для підвищення вірності передачі інформації здійснюється завадостійке кодування, яке забезпечує виявлення і виправлення помилок. Для виявлення помилок у комбінації простого, некоригувального коду вводиться надлишковість. Коди без надлишковості виявляти, а тим більше виправляти помилки не можуть.

У систематичних (n, k) кодах для одержання комбінації коригувального коду до вихідної комбінації з k елементів додають певне число r перевірочних елементів, тобто загальна довжина кодової комбінації $n = k + r$.

Кількість перевірочних елементів визначають із співвідношення

$$2^k \leq \frac{2^n}{(n+1)},$$

звідки $2^r \geq n + 1$.

Ці перевірочні символи формуються з інформаційних за правилами, характерними для кожного коду.

Кількість елементів, у яких будь-які дві комбінації коду відрізняються одна від одної, називають *ковою відстанню*. Мінімальною кодовою відстанню визначаються коригувальні властивості кодів.

Для того, щоб визначити кодову відстань між двома комбінаціями двійкового коду, достатньо підсумувати ці комбінації за модулем 2 і підрахувати кількість одиниць в отриманій комбінації.

Для виявлення не більш h помилок код повинний мати мінімальну кодову відстань $d_{\min} \geq h + 1$.

Для виправлення не більш S помилок код повинний мати

$$d_{\min} \geq 2S + 1.$$

Для виявлення h і виправлення S помилок необхідно, щоб

$$d_{\min} \geq h + S + 1.$$

Коди, у яких інформаційні і коригувальні розряди розташовані за певною системою і завжди займають визначені місця в кодових комбінаціях, називаються *систематичними* кодами.

Прикладом систематичного коду є код Хеммінга. Для побудови комбінації коригувального коду Хеммінга до інформаційних елементів необхідно додати визначене число перевірочних елементів. З цією метою шляхом порозрядного підсумовування за модулем 2 відповідних номерів елементів кодової комбінації, поданих у двійковій системі числення, визначаються номери і значення перевірочних елементів.

Перевірочні суми одержуються за таким правилом. Перша сума складається з елементів, номери яких мають в двійковій системі числення одиниці в молодшому розряді, друга сума – з елементів, номери яких мають одиниці в другому розряді і т.д.

Перевірочні елементи входять тільки один раз в одну з перевірочних сум і доповнюють цю суму до парної кількості одиниць.

У разі появи помилки в прийнятій кодовій комбінації результати перевірочних сум при декодуванні формують двійкове число, яке після перетворення в десяткову систему вказує номер спотвореного елемента.

У теорії циклічних кодів кодові комбінації зазвичай подають у вигляді багаточленів (у формі поліномів) певного ступеня $n - 1$

$$P(x) = a_{n-1}x^{n-1} + a_{n-2}x^{n-2} + \dots + a_1x^1 + a_0x^0,$$

де n – довжина комбінації;

$a_j, j = 0, 1, \dots, n - 1$ – елемент комбінації, який приймає значення для двійкового коду “0” або “1”. Так, наприклад, комбінація 1011 подається поліномом

$$P(x) = 1 \cdot x^3 + 0 \cdot x^2 + 1 \cdot x^1 + 1 \cdot x^0 = x^3 + x + 1.$$

Для одержання комбінації коригувального циклічного коду необхідно помножити задану комбінацію, подану багаточленом, на

одночлен, який має ту ж ступінь, що й обраний утворюючий багаточлен, з наступним додаванням до отриманого добутку залишку від ділення цього добутку на утворюючий багаточлен:

$$F(x) = \frac{U(x) \cdot x^n}{K(x)} = Q(x) + \frac{R(x)}{K(x)},$$

де $Q(x)$ – частка,

$K(x)$ – утворюючий багаточлен,

$R(x)$ – залишок від ділення $U(x) \cdot x^n$ на $K(x)$.

Виявлення помилок у циклічному коді засноване на тому, що поліноми, які відповідають дозволеним комбінаціям, діляться на утворюючий поліном без залишку, а заборонені – із залишком. Виправлення помилок засновано на аналізі залишку.

Циклічні коди отримали свою назву завдяки тому, що певні (або всі) кодові комбінації можуть утворюватися шляхом циклічного зсуву однієї чи кількох інших комбінацій. При цьому зсув виконується справа наліво: символ, який крайній зліва, переноситься в кінець комбінації.

Ймовірність помилкового приймання кодової комбінації з n елементів визначається за формулою:

$$P_{\text{пом } n} = \sum_{i=1}^n C_n^i P_{\text{пом}_{\text{ел}}}^i (1 - P_{\text{пом}_{\text{ел}}})^{n-i},$$

де $C_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!},$

i – кратність помилок,

$P_{\text{пом}_{\text{ел}}}$ – ймовірність помилкового приймання одного елемента кодової комбінації.

ЗАДАЧІ

4.1. Систематичний код, у якому кожна кодова комбінація має 5 інформаційних символів, виправляє одиночні помилки. Визначити кількість розрядів у кодовій комбінації і необхідну кількість перевірочних символів.

4.2. Визначити коригувальну здатність коду 001; 100; 010; 111.

4.3. Яку кількість помилок може виправляти код із $d_{\min} = 7$?

4.4. Чи здатний такий код виправляти помилки 1001010; 0101110; 1101001; 1011100?

4.5. Визначити мінімальну кодову відстань для коду, який виявляє 5 і виправляє 3 помилки.

4.6. Додайте до наведених нижче комбінацій нулі й одиниці таким чином, щоб у результаті перевірок на парність міг бути виявлений один помилковий елемент: 111011; 111010; 111100; 111000; 11011; 111101; 110000.

4.7. Яка максимальна кодова відстань може бути між двома п'ятизначними комбінаціями?

4.8. Чому дорівнює кодова відстань між комбінаціями 11000111001 і 10000011101?

4.9. Показати процес виявлення помилки кодом з постійною вагою на прикладі двійкового коду з кількістю розрядів не менше п'яти.

4.10. Ймовірність спотворення елементів кодової комбінації дорівнює $5 \cdot 10^{-4}$. Обчислити ймовірність правильного приймання двійкової семиелементної комбінації, рахуючи спотворення елементів незалежними.

4.11. Визначити ймовірність поразки завадою всіх семи елементів кодової комбінації, якщо ймовірність спотворення кожного елемента дорівнює $P = 5 \cdot 10^{-2}$. Спотворення елементів вважати незалежними.

4.12. Дана комбінація простого коду 10010. Скласти для неї комбінацію коригувального коду Хеммінга, який дозволяє виправляти

одиначні помилки.

4.13. Прийняті комбінації коригувального коду Хеммінга (9,5)

110010111

110011100

101010101

001011110

Припускається, що в кожному кодовому слові спотворено лише один елемент. Завдання полягає у визначенні його номера.

4.14. В скільки разів підвищиться завадостійкість каналу при використанні коду Хеммінга з виправленням одиночних помилок, якщо довжина кодових комбінацій простого коду дорівнює п'яти, а ймовірність помилки $P = 5 \cdot 10^{-4}$.

4.15. Каналом зв'язку передається сигнал методом частотної маніпуляції. В каналі діє флуктуаційна завада типу білий гауссівський шум. Здійснюється некогерентне приймання сигналів. При цьому забезпечується ймовірність помилкового приймання одного елемента $P_{\text{пом}_{\text{ел}}} = 10^{-4}$. Оцінити ефективність застосування коду Хеммінга (9, 5), який може виправляти одиночні помилки, у порівнянні з кодом МТК-2. При переході до коригувального коду потужність передавача залишається постійною, а величина інтервалу часу, який відводиться для передачі кодової комбінації, не змінюється.

4.16. Який вигляд мають комбінації циклічного коду, отримані шляхом циклічного зсуву утворюючої комбінації 111010?

4.17. Перші три комбінації циклічного коду мають вигляд 101100001; 110000110; 011000011. Побудувати інші комбінації циклічного коду.

4.18. Подати у вигляді багаточленів такі комбінації циклічного коду 0111110; 0011111; 1001111.

4.19. Знайти комбінації циклічного коду, якщо утворюючий многочлен має вигляд $x^3 + x + 1$.

РОЗДІЛ 5. ЗАВАДОСТІЙКІСТЬ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ

5.1. Завадостійкість каналів передачі дискретних повідомлень

Під *завадостійкістю* розуміють здатність каналу зв'язку протистояти шкідливому впливу завад. Завадостійкість каналу передачі дискретних повідомлень може бути оцінена середньою ймовірністю помилкового прийому сигналів (ймовірністю помилки).

Розроблена академіком В.О. Котельниковим теорія потенціальної завадостійкості лежить в основі кількісної оцінки помилкового приймання сигналів. *Потенціальною завадостійкістю* називається максимально можлива (гранична) завадостійкість, яка забезпечується ідеальним приймачем.

Формули для розрахунку потенціальної завадостійкості двійкових каналів зв'язку з різноманітними видами маніпуляції при когерентному і некогерентному способах приймання наведені в табл. 5.1:

$\Phi(x)$ – інтеграл ймовірності, значення якого в залежності від величини аргументу наведені в таблиці (Додаток 4);

$$Q^2 = \frac{E}{G_0} \text{ – відношення енергії сигналу до спектральної щільності}$$

потужності завади.

Графіки потенціальної завадостійкості двійкових каналів зв'язку з постійними параметрами наведені на рис. 5.1.

Граничне перевищення сигналу над завадою визначає потенціальну завадостійкість каналів зв'язку. Практично перевищення сигналу над завадою, близькі до граничного, реалізуються приймачами, смуги пропускання яких узгоджені з шириною спектра сигналу (квазіоптимальні приймачі). Стосовно флуктуаційної завади для дискретних сигналів прямокутної форми відношення потужностей сигналу і завади на виході одиночного коливального контуру визначається співвідношенням:

$$h_{\text{вих}}^2 = \frac{a_{\text{вих.макс}}^2}{2G_0\Delta f_{\text{эф}}} = \frac{a_0^2 \left(1 - e^{-2\Delta f_{\text{эф}}\tau_i}\right)}{2G_0\Delta f_{\text{эф}}} = \frac{a_0^2\tau_i}{2G_0} \frac{\left(1 - e^{-2\Delta f_{\text{эф}}\tau_i}\right)^2}{\Delta f_{\text{эф}}\tau_i} = Q^2 \frac{(1 - 2^{-2\gamma})^2}{\gamma},$$

де $\gamma = \Delta f_{\text{екв}}\tau_i$.

Таблиця 5.1. Формули для розрахунку потенційної завадостійкості
двійкових каналів зв'язку

Вид маніпуляції	Спосіб приймання	
	когерентний	некогерентний
Амплітудна	$P_{\text{пом}} = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\sqrt{\frac{1}{2}} Q^2 \right) \right]$	$P_{\text{пом}} = \frac{1}{4} \left\{ \left[1 - \Phi \left(\sqrt{\frac{1}{2}} Q^2 \right) \right] + e^{-\frac{Q^2}{4}} \right\}$
Частотна	$P_{\text{пом}} = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\sqrt{Q^2} \right) \right]$	$P_{\text{пом}} = (1/2) \cdot e^{-\frac{1}{2}Q^2}$
Фазова	$P_{\text{пом}} = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\sqrt{2} Q^2 \right) \right]$	—
Відносна фазова	$P_{\text{пом}} = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi^2 \left(\sqrt{2} Q^2 \right) \right]$	$P_{\text{пом}} = \frac{1}{2} \cdot e^{-Q^2}$

Оптимальна смуга частот одиночного коливального контуру для заданої тривалості сигналу визначається співвідношенням $\Delta f_{\text{эф.опт}} = 0,65/\tau_i$, а перевищення сигналу над завадою $h_{\text{опт}}^2 = 0,815Q^2$.

Якщо використовується ідеальний смуговий фільтр, то $\Delta f_{\text{опт}} = 1,37/\tau_i$, $h_{\text{опт}}^2 = 0,825Q^2$. Для більшості каналів зв'язку характерні спотворення сигналів, що виникають через випадкові зміни коефіцієнта передачі каналу. Такі спотворення називаються мультиплікативними (неадитивними) завадами. Прикладом таких завад є завмирання сигналів. Ефективним способом боротьби з завмираннями сигналів є рознесене приймання. Формули для розрахунку середньої ймовірності помилки в каналах із завмираннями сигналів наведені в табл. 5.2, а графіки потенційної завадостійкості в каналах зв'язку з завмираннями на рис. 5.2.

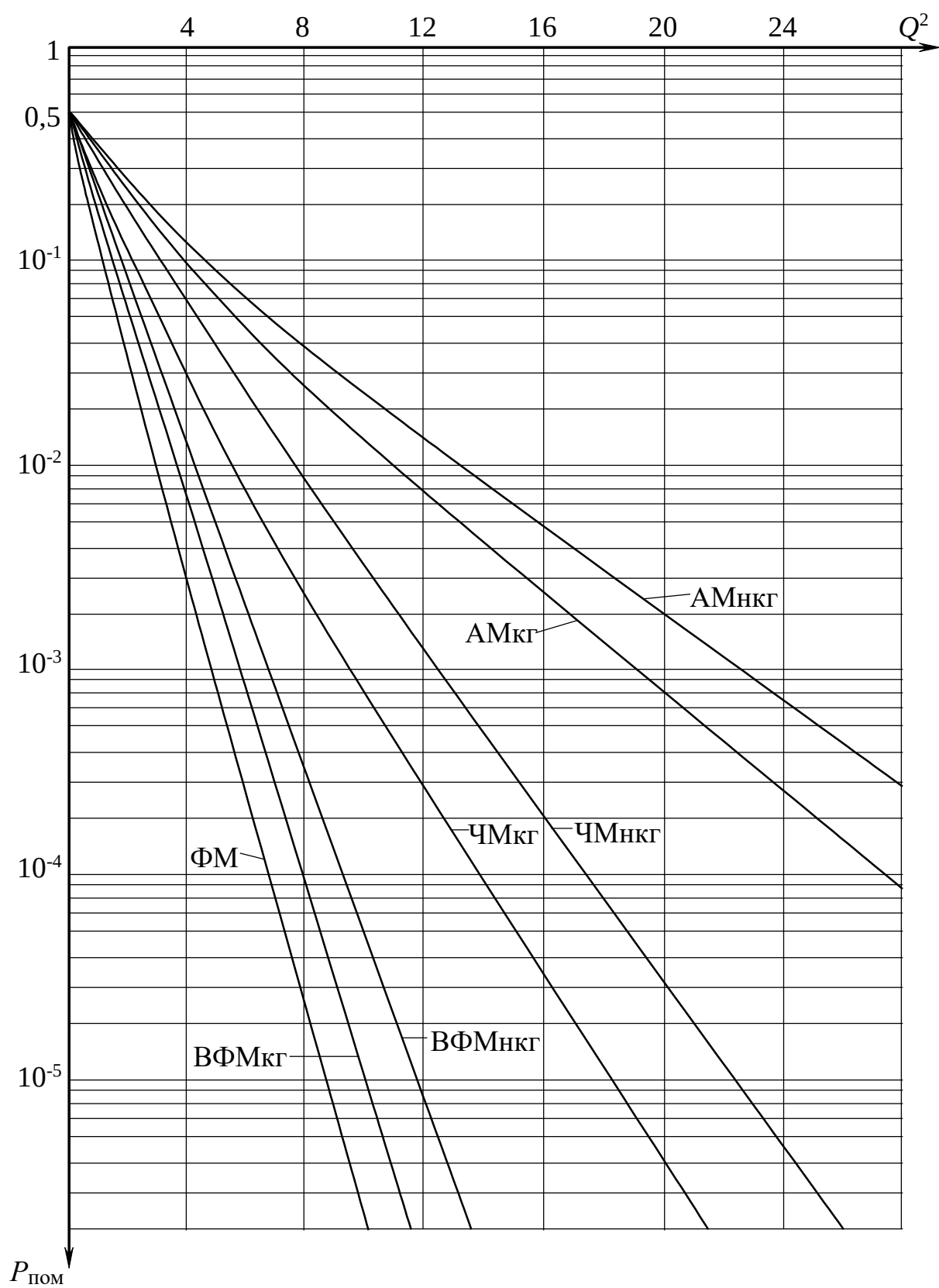


Рис. 5.1 Завадостійкість каналів передачі з постійними параметрами

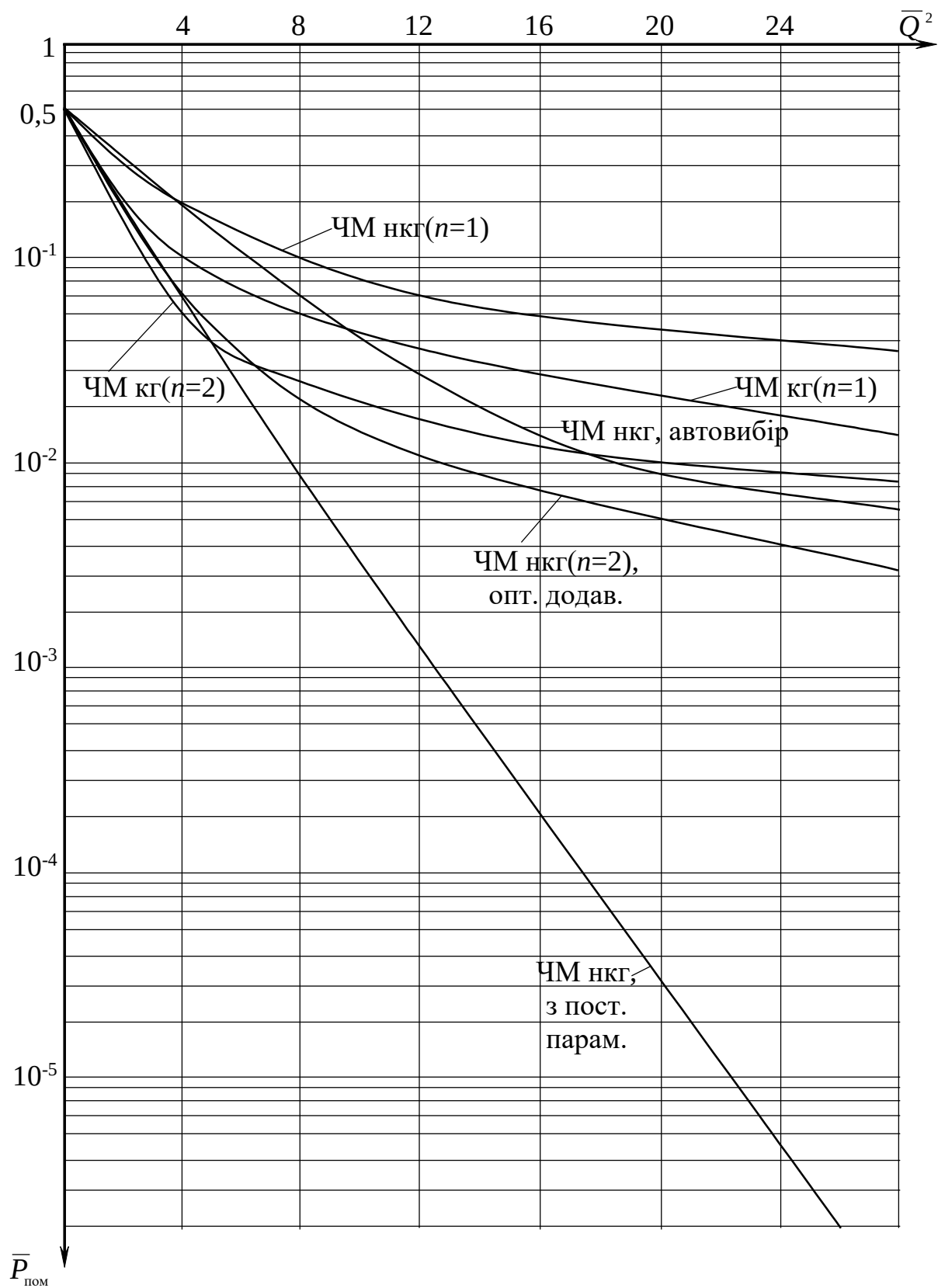


Рис. 5.2. Завадостійкість каналів передачі з завмираннями

ЗАДАЧІ

5.1. Визначити максимальне перевищення сигналу над флуктуаційною завадою (шумом) на виході фільтра, узгодженого з радіоімпульсом прямокутної форми, при когерентному способі реєстрації, якщо швидкість передачі сигналів $\nu_c = 100$ Бод, амплітуда сигналу $a_0 = 2$ В, а спектральна щільність середньої потужності шуму $G_0 = 2 \cdot 10^{-3}$ Вт/Гц.

5.2. Визначити максимальну завадостійкість двійкового каналу зв'язку при когерентному прийманні сигналів з амплітудою маніпуляцією на фоні флуктуаційної завади типу білий гауссівський шум, якщо відношення сигнал/завада $Q^2 = 10$.

5.3. В скільки разів необхідно збільшити потужність передавача при переході від відносної фазової маніпуляції до частотної, щоб ймовірність помилки залишилася незмінною і дорівнювала 10^{-2} (приймання некогерентне)?

5.4. Розрахувати енергетичний виграш, який можна одержати при переході від когерентного до некогерентного приймання сигналів з частотною маніпуляцією для значень ймовірностей помилки 10^{-2} і 10^{-4} .

5.5. Визначити необхідне відношення сигнал/завада Q^2 при передачі двійкових сигналів з відотною фазовою маніпуляцією, при якому забезпечується ймовірність помилки $P_{\text{пом}} \leq 0,005$.

5.6. Одержати аналітичний вираз перевищення сигналу над флуктуаційною завадою на виході одиночного коливального контуру й узгодженого фільтра і побудувати графік залежності

$$h_{\text{вих.ок}}^2 / Q_{\text{уф}}^2 = \varphi(\gamma),$$

де $\gamma = \Delta f_{\text{эф}} \tau_i$

5.7. Амплітудно-частотні характеристики приймального тракту для двох значень смуги пропускання (6 і 10 кГц) зображені на рис. 5.3. Визначити графічним способом відповідні їм еквівалентні ефективні значення смуг пропускання

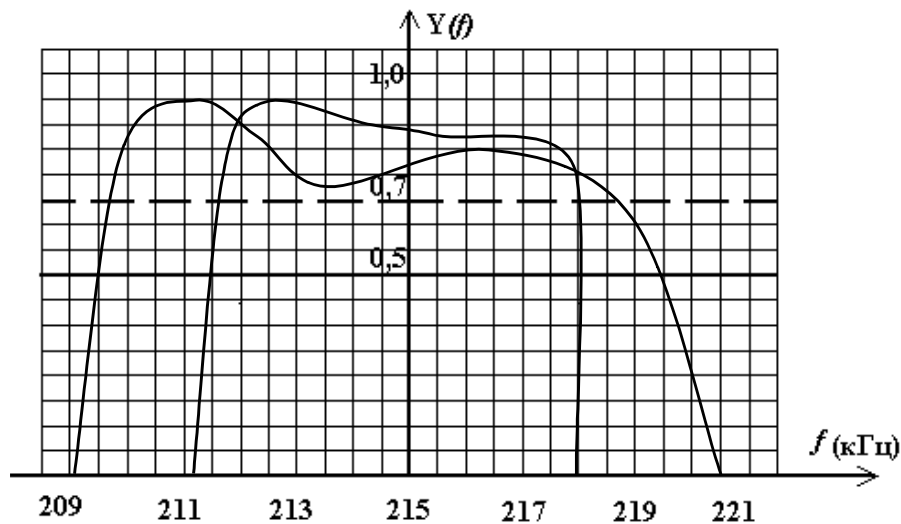


Рис. 5.3. Амплітудно-частотні характеристики приймального тракту

5.8. Використовуючи аналітичний вираз, отриманий в задачі 5.6, визначити оптимальне значення ефективної смуги пропускання одиночного коливального контуру, що відповідає максимальному значенню $h_{\text{вих}}^2$.

5.9. Для приймання прямокутних радіоімпульсів замість узгодженого фільтра використовують одиночний коливальний контур з оптимальною смугою пропускання. Визначити, який при цьому буде енергетичний програв.

5.10. Визначити максимальну завадостійкість двійкового каналу зв'язку при когерентному прийманні сигналів з частотною маніпуляцією на фоні флуктуаційної завади, якщо відношення сигнал/завада $Q^2 = 5$.

5.11. При передачі сигналів з відносною фазовою маніпуляцією забезпечується ймовірність помилки, яка дорівнює $P_{\text{пом}} = 0,01$. В скільки разів необхідно збільшити потужність сигналу, щоб ймовірність помилки стала рівною 0,005?

5.12. Визначити максимальну завадостійкість двійкового каналу зв'язку при когерентному і некогерентному способах приймання сигналів з

ВФМ на фоні флуктуаційної завади, якщо відношення сигнал/завада на виході демодулятора дорівнює 5 дБ.

5.13. У приймачі для приймання сигналів з ВФМ використовується смугової фільтр з амплітудно-частотною характеристикою, близькою до прямокутної. Визначити оптимальне значення його смуги пропускання при прийманні сигналу на фоні флуктуаційної завади зі швидкістю 300 Бод.

5.14. У приймачі використовується інтегральний спосіб реєстрації дискретних сигналів. Інтегратор виконаний як RC -фільтр ($R = 6,8$ кОм, $C = 0,5$ мкФ). Визначити, для якої швидкості передачі сигналів цей фільтр є оптимальним.

5.15. Сигнал і імпульсна завада з прямокутною формою своїх обвідних, які поступають на вхід амплітудного обмежувача й одноконтурного резонансного підсилювача, мають амплітуди 10 мВ та 100 мВ і тривалості 1 мс та 0,1 мс відповідно. Визначити відношення амплітуд сигналу і завади на виході зазначених пристроїв.

5.16. На вхід радіоприймача, побудованого за схемою ШОВ, поступають сигнали коду Морзе та імпульсна завада. Тривалість імпульсу “крапка” – 1 мс, а імпульсу “тире” – 3 мс. Тривалість імпульсу завади на вході обмежувача – 1 мкс. Визначити відношення амплітуд сигналу і завади на виході схеми ШОВ для випадків, коли смуга пропускання вузькосмугового тракту у вигляді одноконтурного підсилювача узгоджена з тривалістю імпульсу “крапка” і з тривалістю імпульсу “тире”.

5.17. На вході приймача зі смугою пропускання загального тракту 5 кГц діє завада у вигляді короткочасних відеоімпульсів з частотою повторення 18 кГц. Чи можна на вході загального тракту вважати таку заваду імпульсною?

5.18. При відсутності завмирань ймовірність помилкового некогерентного приймання телеграфних сигналів з частотною маніпуляцією дорівнює 0,005. Визначити, яка може бути досягнута

ймовірність помилки при тому ж відношенні сигнал/шум у випадку релеевських завмирань (приймання сигналу некогерентне).

5.19. При когерентному прийманні сигналів з частотною маніпуляцією у каналі з релеевськими завмираннями досягнута ймовірність помилки 0,07. Визначити виграш у завадостійкості при рознесеному прийманні цього ж сигналу методом автовибору.

5.20. Яку форму амплітудно-частотної характеристики має загальний тракт приймача, якщо його реакції на імпульсну заваду мають вигляд, зображений на рис. 5.4?

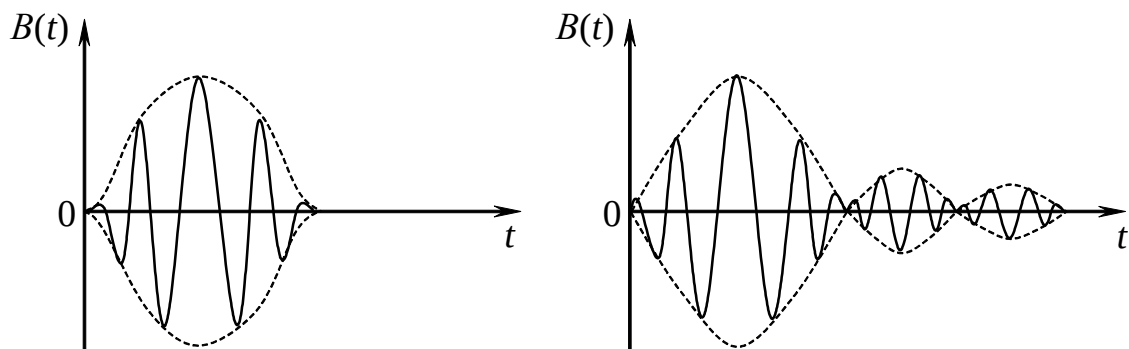


Рис. 5.4. Імпульсна реакція загального тракту приймача на дію завади

5.21. Розрахувати і порівняти між собою відношення сигнал / завада Q^2 і $\bar{Q}^2$ відповідно для каналів з постійними і змінними параметрами. Необхідна завадостійкість при передачі дискретних повідомлень сигналами з частотною маніпуляцією (ЧМ) $P_{\text{пом}} = 5 \cdot 10^{-4}$. Приймання сигналів некогерентне.

5.22. Багатопроменевий канал передачі характеризується часом багатопроменевості $\Delta T_L = 0,4$ мкс і доплерівською зоною $\Delta f_D = 10$ Гц. Каналом здійснюється передача цифрових сигналів з ВФМ. Визначити діапазон швидкостей передачі цифрових сигналів, при яких завмирання

сигналів можна вважати загальними.

5.23. Сигнал передається каналом зв'язку з релесівськими завмираннями методом ЧМ. Спосіб приймання сигналу некогерентний. При цьому забезпечується $\bar{P}_{\text{пом}} = 5 \cdot 10^{-2}$. Розрахувати, у скільки разів можна зменшити $\bar{P}_{\text{пом}}$ при застосуванні рознесеного приймання з кратністю рознесення $n = 2, 3, \dots 8$. На приймальній стороні використовується оптимальне додавання сигналів.

5.2. Завадостійкість каналів передачі неперервних повідомлень

Для оцінки завадостійкості приймання неперервних повідомлень використовуються енергетичні та статистичні критерії.

Потужність завади на виході приймача визначається середньоквадратичною помилкою

$$\varepsilon^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [y(t) - x(t)]^2 dt,$$

де $x(t)$ – переданий сигнал; $y(t)$ – прийнятий сигнал; T – інтервал спостереження.

Для порівняльної оцінки завадостійкості неперервних каналів зв'язку при різноманітних способах передачі повідомлень використовується поняття виграшу. Виграшем у завадостійкості називають відношення перевищення сигналу над завадою на виході приймача h_0^2 до перевищення сигналу над завадою на його вході h^2

$$\lambda = \frac{h_0^2}{h^2},$$

де h_0^2 – перевищення сигналу над завадою на виході ідеального приймача;

h^2 – перевищення сигналу над завадою на виході приймача.

Виграш оцінює ефективність застосування модульованих сигналів у

порівнянні з безпосередньою передачею повідомлення.

При порівнянні по завадостійкості сигналів з різноманітними видами модуляції використовується критерій “узагальнений виграш”, у якому не враховується ширина смуги, яка займається модульованим сигналом

$$q = \lambda \frac{\Delta f_A}{\Delta F_c},$$

де ΔF_c – ширина спектра первинного сигналу, Δf_A – ширина спектра модульованого сигналу.

Для оцінки якості передачі мовних сигналів використовується критерій розбірливості.

Формули для розрахунку завадостійкості каналів при передачі сигналів з різноманітними видами модуляції наведені в табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Вид модуляції	Параметри				
	P_A	h_0^2	h^2	λ	q
АМ	$\frac{1}{2} a_0^2 (1 + m_{AM}^2)$	$\frac{(a_0 m_{AM})^2}{2 G_0 \Delta F_c}$	$\frac{1}{2} \frac{a_0^2 (1 + m_{AM}^2)}{G_0 2 \Delta F_c}$	$2 \frac{m_{AM}^2}{1 + m_{AM}^2}$	$\frac{m_{AM}^2}{1 + m_{AM}^2}$
БМ	$\frac{1}{2} a_0^2$	$\frac{a_0^2}{2 G_0 \Delta F_c}$	$\frac{1}{2} \frac{a_0^2}{G_0 2 \Delta F_c}$	2	1
ОМ	a_0^2	$\frac{a_0^2}{G_0 \Delta F_c}$	$\frac{a_0^2}{G_0 \Delta f_A}$	1	1
ФМ	$\frac{1}{2} a_0^2$	$\frac{(a_0 m_{FM})^2}{2 G_0 \Delta F_c}$	$\frac{a_0^2}{2 G_0 \Delta f_A}$	$m_{FM}^2 \frac{\Delta f_A}{\Delta F_c}$	m_{FM}^2
ЧМ	$\frac{1}{2} a_0^2$	$\frac{3(a_0 m_{CM})^2}{2 G_0 \Delta F_c}$	$\frac{a_0^2}{2 G_0 \Delta f_A}$	$3m_{CM}^2 \frac{\Delta f_A}{\Delta F_c}$	$3m_{CM}^2$

З імпульсних видів модуляції найбільше поширення одержала модуляція часового положення (фаза) імпульсів неперервним сигналом (ФІМ) у сполученні з іншими видами модуляції (ФІМ-АМ, ФІМ-ЧМ).

Формула для розрахунку узагальненого виграшу для сигналів з ФІМ має вигляд

$$q_{\text{ФІМ}} = \Delta t_{\text{макс}}^2 \frac{\int_0^{\tau_i} \left[\frac{du(t)}{dt} \right]^2 dt}{\int_0^{\tau_i} u^2(t) dt},$$

де $\Delta t_{\text{макс}}$ – девіація імпульсу сигналу,

$\int_0^{\tau_i} \left[\frac{du(t)}{dt} \right]^2 dt$ – швидкість зміни обвідної сигналу,

$\int_0^{\tau_i} u^2(t) dt$ – енергія сигналу.

ЗАДАЧІ

5.24. Визначити необхідне значення амплітуди мовного сигналу на вході приймача для забезпечення на виході приймача перевищення сигналу над флуктуаційною завадою $h_0^2 = 20$ для таких режимів роботи:

а) АЗ, $\Delta f_{\text{эф}} = 8$ кГц, $m_{\text{сер}} = 0,3$;

б) F3, $\Delta f_{\text{эф}} = 16$ кГц.

Спектральна щільність середньої потужності завади на виході приймача визначається за формулою

$$G_{0N} = 4kTR_A N,$$

де $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град – постійна Больцмана;

$$T = 300^0 \text{ К},$$

$$R_A = 300 \text{ Ом} - \text{вхідний опір антени};$$

$$N = 10 - \text{коефіцієнт шуму приймача}.$$

5.25. При якому коефіцієнті частотної модуляції можна забезпечити узагальнений виграш $q = 26$ дБ при переході від амплітудної модуляції ($m_{\text{сер}} = 0,5$) до частотної модуляції при незмінній потужності прийнятого сигналу?

5.26. При якій смузі пропускання приймача частотно-модульованих сигналів може бути забезпечений узагальнений виграш у завадостійкості 10 дБ, якщо максимальна частота первинного сигналу дорівнює 3,4 кГц?

5.27. Визначити мінімальне значення амплітуди сигналу на вході приймача, яке забезпечує при передачі мовного сигналу методом ФІМ роботу в надпороговій області, якщо $\Delta t_{\text{макс}} = 10\tau_i$, $\tau_i = 1$ мкс, $t_{\text{сер}} = 0,35$ мкс, коефіцієнт заповнення $\gamma = 0,01$. Визначити, який при цьому можна одержати узагальнений виграш.

5.28. Оцінити завадостійкість каналів передачі сигналів із різноманітними видами модуляції (АМ, ЧМ, ОМ, ФІМ) за критерієм

«узагальнений виграш» при передачі гармонійного сигналу з частотою 1 кГц. При розрахунку використовувати такі параметри модульованих сигналів: коефіцієнт амплітудної модуляції $m_{\text{сер}} = 0,5$, девіація частотно-модульованого сигналу $\Delta f_d = 5$ кГц, тривалість імпульсу сигналу з ФІМ $\tau_i = 0,3$ мкс, девіація імпульсів $\Delta t_{\text{макс}} = 1$ мкс, тривалість фронтів імпульсів $t_{\phi} = 0,35$ мкс.

5.29. Для передачі телевізійного сигналу, який має ширину спектра 6,5 МГц, використовується частотна модуляція з девіацією частоти 5 МГц, Визначити який при цьому одержується узагальнений виграш у завадостійкості.

5.30. Перевищення середньої потужності односмугового сигналу над середньою потужністю флуктуаційної завади h^2 на вході приймача дорівнює 30. Визначити перевищення сигналу над шумом на виході ідеального приймача односмугових сигналів.

Відповіді на задачі

Розділ 1

1.1. $C_0 = 60$ В; $C_1 = 76,4$ В; $C_3 = 25,5$ В; $C_5 = 15,3$ В; $F = 25$ Гц. 1.3. 25 Гц; 75 Гц; 600 Гц. 1.4. 10 кБод. 1.5. 0,02 с. 1.6. 6,45 символів/с.

$$1.7. R(\tau) = (1 - 0,5 \cdot 10^{-3} |\tau|), \quad G(\omega) = 2 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{\sin 10^{-3} \omega}{10^{-3} \omega} \right).$$

$$1.8. C_1(t) = 0,25 + 0,5 \sum_{n=1}^{\infty} \left| \frac{\sin \frac{n\pi}{4}}{\frac{n\pi}{4}} \right| \cdot \sin 2\pi F_1 t, \quad F_1 = 0,25 \text{ МГц};$$

$$C_2(t) = 0,5 \sum_{n=1}^{\infty} \left| \sin \frac{n\pi}{2} \cdot \frac{\sin \frac{n\pi}{8}}{\frac{n\pi}{8}} \right| \cdot \left[\cos \left(n 2\pi F_2 t + n \frac{\pi}{2} \right) \right], \quad F_2 = 0,125 \text{ МГц}.$$

1.9. 250 кГц, 125 кГц. 1.10. 3 кГц. 1.11. 6 МГц. 1.12. 3,67 МГц. 1.13. $2,816 \cdot 10^6$ символів/с. 1.14. 13,3 дБ. 1.15. 2400 В/с. 1.16. $0,021 \cdot 10^{-3}$ Вт. 1.17. 48 кГц. 1.18. 7. 1.19. 46,5 Гц при $n = 5$. 1.20. $n = 1$. 1.21. 15,7 кГц, 265 Гц. 1.22. 1,55 кБод. 1.23. 200 Гц, 1200 Гц. 1.24. 400 Гц при $n = 3$. 1.25. 330 Гц. 1.26. 225 Бод. 1.27. 770 Гц.

$$1.29. G(\omega) = \frac{1}{2} a_0^2 \cdot T \frac{\sin^2 \left(\frac{\omega - \omega_0}{2} T \right)}{\left[\left(\frac{\omega - \omega_0}{2} T \right) \right]^2}. \quad 1.30. 3,6 \text{ кГц, при } n = 3. \quad 1.31. T; \frac{1}{T}.$$

1.32. 0,66; 1237,5 Вт. 1.33. 1,4. 1.34. 1,5. 1.35. 23,7 кГц. 1.36. 96 кГц. 1.37. 140 кГц. 1.38. $f_{\min} = 49995$ кГц; $f_{\max} = 50005$ кГц. 1.39. $a_0 = 1,78$; $a_1 = 3,28$; $a_2 = 0,77$; $a_3 = 3,65$; $a_4 = 3,91$; $a_5 = 2,61$; $a_6 = 1,31$; $a_7 = 0,53$; $a_8 = 0,18$. 1.40. $100 \cos(125,6 \cdot 10^6 t + 3 \sin(5,024 \cdot 10^3 t + 90^\circ) + 60^\circ)$; $125,6 \cdot 10^6 + 15,072 \cdot 10^3 \cos(5,024 \cdot 10^3 t + 90^\circ)$. 1.41. 56 кГц, 47,3 кГц.

1.42. $\Delta f_{\text{ЧМ}} = 188 \text{ кГц}$, $\Delta f_{\text{ФМ}} = 1814 \text{ кГц}$. 1.43. $6,6 \text{ МГц}$. 1.44. $8,5 \text{ МГц}$.
 1.45. 24. 1.46. $6,6 \cdot 10^3$. 1.48. 300 Бод; 350 Бод; 750 Бод. 1.49. 350 Гц; 850 Гц;
 900 Гц. 1.50. 9,6 кбіт/с. 1.52. 96. 1.53. 4,16 мкс, 480 кГц.

Розділ 2

2.1. $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}$. 2.2. $G_0 \cdot \Delta f \cdot K_0^2 \left| \frac{\sin \pi \Delta f \tau}{\pi \Delta f \tau} \right| \cos 2\pi f_0 \tau$.

$$2.3. P(y) = \begin{cases} \frac{1}{|k| \sqrt{2\pi\sigma_x^2}} e^{-\frac{(y - km_x)^2}{2\kappa^2 \sigma_x^2}} + \left[1 - \Phi\left(\frac{a - km_x}{\kappa\sigma_x}\right) \right] \delta(y - a) + \\ + \left[1 - \Phi\left(\frac{a + km_x}{\kappa\sigma_x}\right) \right] \delta(y + a), -a \leq y \leq a; \\ 0, -a > y > a. \end{cases}$$

2.4. 0,136. 2.5. π ; $\frac{4}{3}\pi^2$. 2.6. $3,7 \cdot 10^{-6}$. 2.7. $3,3 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}$. 2.8. 3,2 Вт.

2.9. $P(y) = \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{2\pi y \sigma^2}} e^{-\frac{y}{2a\sigma^2}}$. 2.10. 2,83; 3,53. 2.11. 0,62 Вт. 2.12. 4 кГц.

2.13. 0,8 В. 2.14. $0,54 \cdot 10^{-3} \text{ с}$. 2.15. 2 %. 2.17. 0,94 В. 2.18. 100 Гц.
 2.19. Від 10 до 1,25 МБод.

Розділ 3

3.5. 13,02 біт. 3.6. 14,28 біт. 3.7. 0,102 біт. 3.8. 919 біт/с. 3.9. 20 біт/с.
 3.10. 577,6 кбіт/с. 3.11. 346 кбіт/с, 1 Мбіт/с. 3.13. $2,4 \cdot 10^{-17} \text{ Вт}$. 3.15. 3,32 біт.
 3.16. 0,09 біт. 3.17. 1166,2 біт/с; 1199 біт/с. 3.18. 3,94 біт. 3.19. 6,64 біт.
 3.20. 0,03 біт. 3.21. 5 біт; 12 біт. 3.22. 0,05 біт; 4,36 біт. 3.23. 0,6 біт.
 3.24. 2,58 біт. 3.25. 0; 0,0093 біт. 3.26. 0,76 біт/повідомл.

Розділ 4

4.1. $n = 9; r = 4$. 4.10. 0,996. 4.13. 4; 3; 9; 7. 4.14. В 277 разів. 4.15. 0,9.

Розділ 5

5.1. 20. 5.2. $1,25 \cdot 10^{-2}$. 5.3. 2. 5.4. 1,44; 1,23. 5.5. $Q_{\text{пш}}^2 = 3,7; Q_{\text{пф}}^2 = 4,6$.

5.8. $\Delta f_{\text{екв.опт}} = 0,65/\tau_i$. 5.9. $h_{\text{опт}}^2 = 0,815Q^2$. 5.10. $1,25 \cdot 10^{-2}$. 5.11. 1,47; 1,18.

5.12. $P_{\text{пом кг}} = 2,12 \cdot 10^{-2}; P_{\text{пом нкг}} = 1,25 \cdot 10^{-2}$.

5.13. 500 кГц. 5.14. 1; 10. 5.16. 1) $\Delta f_{\text{эф}} = 650$ Гц; с/з для «точки» 36,5 і для «тире» 49; 2) $\Delta f_{\text{эф}} = 216$ Гц; с/з для «точки» 41; для «тире» 79. 5.18. 0,23.

5.19. 1,24. 5.21. 13,8; 1998. 5.22. 10 Бод...1,25 МБод. 5.24. 6,4 мкВ; 1,6 мкВ.

5.25. 5,15. 5.26. 21,4 кГц. 5.27. 1000 мкВ; 1380. 5.28. $q_{\text{ФІМ}} = 100$.

5.29. 1,77. 5.30. 30.

ДОДАТКИ

Додаток 1

РОЗПОДІЛ ЙМОВІРНОСТЕЙ БУКВ В УКРАЇНСЬКИХ ТЕКСТАХ

Буква	Ймовір- ність	Буква	Ймовір- ність	Буква	Ймовір- ність	Буква	Ймовір- ність
Пробіл	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		

РОЗПОДІЛ ЙМОВІРНОСТЕЙ БУКВ В АНГЛІЙСЬКИХ ТЕКСТАХ

Буква	Ймовір- ність	Буква	Ймовір- ність	Буква	Ймовір- ність	Буква	Ймовір- ність
Пробіл	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		

ДВІЙКОВІ ЛОГАРИФМИ ЦІЛИХ ЧИСЕЛ

A	$\log_2 A$	A	$\log_2 A$	A	$\log_2 A$
1	0,00000	38	5,24793	75	6,22882
2	1,00000	39	5,28540	76	6,24793
3	1,58496	40	5,32193	77	6,26679
4	2,00000	41	5,35755	78	6,28540
5	2,32193	42	5,39232	79	6,30378
6	2,58496	43	5,42626	80	6,32193
7	2,80735	44	5,45943	81	6,33985
8	3,00000	45	5,49185	82	6,35755
9	3,16993	46	5,52356	83	6,37504
10	3,32193	47	5,55459	84	6,39232
11	3,45943	48	5,58496	85	6,40939
12	3,58496	49	5,61471	86	6,42626
13	3,70044	50	5,64386	87	6,44294
14	3,80735	51	5,67242	88	6,45943
15	3,90689	52	5,70044	89	6,47573
16	4,00000	53	5,72792	90	6,49185
17	4,08746	54	5,75489	91	6,50779
18	4,16993	55	5,78136	92	6,52356
19	4,24793	56	5,80735	93	6,53916
20	4,32193	57	5,83289	94	6,55459
21	4,39232	58	5,87798	95	6,58986
22	4,45943	59	5,88264	96	6,58496
23	4,52356	60	5,90689	97	6,69991
24	4,58496	61	5,93074	98	6,61471
25	4,64386	62	5,95420	99	6,62936
26	4,70044	63	5,97728	100	6,64386

27	4,75489	64	6,00000	200	7,644
28	4,80735	65	6,02237	300	8,229
29	4,85798	66	6,04439	400	8,614
30	4,90689	67	6,06609	500	8,966
31	4,95420	68	6,08746	600	9,229
32	5,00000	69	6,10852	700	9,451
33	5,04439	70	6,12928	800	9,644
34	5,08746	71	6,14975	900	9,814
35	5,12928	72	6,16992	1000	9,965
36	5,16993	73	6,18982	10000	13,288
37	5,20945	74	6,20945		

ЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИН P ТА $P \log_2 P$

P	$-P \log_2 P$	P	$-P \log_2 P$	P	$-P \log_2 P$
0,00	-	0,36	0,5306	0,71	0,3508
0,01	0,0664	0,37	0,5307	0,72	0,3412
0,02	0,1129	0,38	0,5304	0,73	0,3314
0,03	0,1517	0,39	0,5298	0,74	0,3215
0,04	0,1857	0,40	0,5288	0,75	0,3113
0,05	0,2161	0,41	0,5274	0,76	0,3009
0,06	0,2435	0,42	0,5256	0,77	0,2903
0,07	0,2686	0,43	0,5236	0,78	0,2796
0,08	0,2915	0,44	0,5211	0,79	0,2687
0,09	0,3127	0,45	0,5184	0,80	0,2575
0,10	0,3322	0,46	0,5153	0,81	0,2464
0,11	0,3503	0,47	0,5120	0,82	0,2348
0,12	0,3671	0,48	0,5083	0,83	0,2231
0,13	0,3826	0,49	0,5043	0,84	0,2113
0,14	0,3971	0,50	0,5000	0,85	0,1993
0,15	0,4105	0,51	0,4954	0,86	0,1871
0,16	0,4230	0,52	0,4906	0,87	0,1748
0,17	0,4346	0,53	0,4854	0,88	0,1623
0,18	0,4454	0,54	0,4800	0,89	0,1496
0,19	0,4552	0,55	0,4744	0,90	0,1368
0,20	0,4644	0,56	0,4684	0,91	0,1238
0,21	0,4728	0,57	0,4623	0,92	0,1107
0,22	0,4806	0,58	0,4558	0,93	0,0974
0,23	0,4877	0,59	0,4491	0,94	0,0839
0,24	0,4941	0,60	0,4422	0,95	0,0703
0,25	0,5000	0,61	0,4350	0,96	0,0565

0,26	0,5053	0,62	0,4276	0,97	0,0426
0,27	0,5300	0,63	0,4199	0,98	0,0286
0,28	0,5142	0,64	0,4121	0,99	0,0140
0,29	0,5179	0,65	0,4040		
0,30	0,5211	0,66	0,3957		
0,31	0,5238	0,67	0,3871		
0,32	0,5260	0,68	0,3784		
0,33	0,5278	0,69	0,3694		
0,34	0,5292	0,70	0,3602		
0,35	0,5301				

ТАБЛИЦЯ ЗНАЧЕНЬ ФУНКЦІЙ БЕССЕЛЯ

$m_{\text{ЧМ}}$ n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	76,5	22,4	-26,0	-39,7	-17,8	15,1	30,1	17,2	-9,0	-24,6
1	44,0	57,7	33,9	-6,6	-32,8	-27,7	-0,5	23,5	24,5	4,4
2	11,5	35,3	48,6	36,4	4,7	-24,3	-30,1	-11,3	14,5	25,5
3	2,0	12,9	30,9	43,0	36,5	11,5	-16,8	-29,1	-18,1	5,8
4	0,25	3,4	13,2	28,1	39,1	35,8	15,8	-10,5	-26,6	-22,0
5		0,7	4,3	13,2	26,1	36,2	34,8	18,6	-5,5	-23,4
6			1,1	4,9	13,1	26,4	33,9	33,8	20,4	-1,5
7			0,3	1,5	5,3	13,0	23,4	32,1	32,8	21,7
8				0,4	1,8	5,7	12,3	22,4	30,5	31,8
9					0,5	2,1	5,9	12,6	21,5	29,2
10						0,7	2,4	6,1	12,5	20,8
11							0,8	2,6	6,2	12,3
12								1,0	2,7	6,3
13								0,3	1,1	2,9
14									0,4	1,2
15										0,4

ТАБЛИЦЯ ЗНАЧЕНЬ ІНТЕГРАЛА ЙМОВІРНОСТІ

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
0,00	0,0000	48	0,3688	96	0,6629	44	0,8501
01	0,0080	49	0,3759	97	0,6680	1,45	0,8529
02	0,0160	0,50	0,3829	98	0,6729	46	0,8557
03	0,0239	51	0,3899	99	0,6778	47	0,8584
04	0,0319	52	0,3969	1,00	0,6827	48	0,8611
0,05	0,0399	53	0,4039	01	0,6875	49	0,8638
06	0,4778	54	0,4108	02	0,6923	1,50	0,8664
07	0,0558	0,55	0,4177	03	0,6970	51	0,8690
08	0,0638	56	0,4245	04	0,7017	52	0,8715
09	0,0717	57	0,4313	1,05	0,7063	53	0,8740
0,10	0,0797	58	0,4381	06	0,7109	54	0,8764
11	0,0876	59	0,4448	07	0,7154	1,55	0,8789
12	0,0955	0,60	0,4515	08	0,7199	56	0,8812
13	0,1034	61	0,4581	09	0,7243	57	0,8836
14	0,1113	62	0,4647	1,10	0,7287	58	0,8859
0,15	0,1192	63	0,4713	11	0,7330	59	0,8882
16	0,1271	64	0,4778	12	0,7373	1,60	0,8904
17	0,1350	0,65	0,4843	13	0,7415	61	0,8926
18	0,1428	66	0,4907	14	0,7457	62	0,8948
19	0,1507	67	0,4971	1,15	0,7499	63	0,8969
0,20	0,1585	68	0,5035	16	0,7540	64	0,8990
21	0,1663	69	0,5098	17	0,7580	1,65	0,9011
22	0,1741	0,70	0,5161	18	0,7620	66	0,9031
23	0,1819	71	0,5223	19	0,7666	67	0,9051
24	0,1897	72	0,5285	1,20	0,7699	68	0,9070
0,25	0,1974	73	0,5346	21	0,7737	69	0,9090
26	0,2051	74	0,5407	22	0,7775	1,70	0,9109
27	0,2128	0,75	0,5467	23	0,7813	71	0,9127
28	0,2205	76	0,5527	24	0,7850	72	0,9146

29	0,2282	77	0,5587	1,25	0,7887	73	0,9164
0,30	0,2358	78	0,5646	26	0,7923	74	0,9181
31	0,2434	79	0,5705	27	0,7959	1,75	0,9199
32	0,2510	0,80	0,5763	28	0,7995	76	0,9216
33	0,2586	81	0,5921	29	0,8029	77	0,9223
34	0,2661	82	0,5878	1,30	0,8064	78	0,9249
0,35	0,2737	83	0,5935	31	0,8098	79	0,9265
36	0,2812	84	0,5991	32	0,8132	1,80	0,9281
37	0,2886	0,85	0,6047	33	0,8165	81	0,9297
38	0,2961	86	0,6102	34	0,8198	82	0,9312
39	0,3035	87	0,6157	1,35	0,8230	83	0,9328
0,40	0,3108	88	0,6211	36	0,8262	84	0,9342
41	0,3182	89	0,6265	37	0,8293	1,85	0,9357
42	0,3255	0,90	0,6319	38	0,8324	86	0,9371
43	0,3328	91	0,6372	39	0,8355	87	0,9385
44	0,3401	92	0,6424	1,40	0,8385	88	0,9399
0,45	0,3473	93	0,6476	41	0,8415	89	0,9412
46	0,3545	94	0,6528	42	0,8444	1,90	0,9426
47	0,3616	0,95	0,6579	43	0,8473	91	0,9639
92	0,9451	10	0,9643	60	0,9907	20	0,99863
93	0,9464	15	0,9684	65	0,9920	30	0,99903
94	0,9476	20	0,9722	70	0,9931	40	0,99933
1,95	0,9488	2,25	0,9756	2,75	0,9940	3,50	0,99953
96	0,9500	30	0,9786	80	0,9949	60	0,99968
97	0,9512	35	0,9812	85	0,9956	70	0,99978
98	0,9523	40	0,9836	90	0,9963	80	0,99986
99	0,9534	45	0,9857	95	0,9968	90	0,99990
2,00	0,9545	2,50	0,9876	3,00	0,99730	4,00	0,99994
05	0,9596	55	0,9892	10	0,99806	4,417	1-10 ⁻⁵
						4,892	1-10 ⁻⁶
						5,327	1-10 ⁻⁷

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Основи теорії телекомунікацій і радіотехніки [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності 172 “Телекомунікації та радіотехніка” / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: П.В. Кучернюк. – Електронні текстові дані. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 290 с.
2. Теорія електрозв’язку : конспект лекцій / укладачі: О. М. Кобяков, І. А. Кулик. – Суми: Сумський державний університет, 2022. – 124 с.
3. Горбатий І.В. Методи формування й оброблення сигналів у телекомунікаційних системах: монографія / І.В. Горбатий, Р.І. Желяк, М.Д. Кіселичник; за загальною редакцією І.В. Горбатого // Міністерство освіти і науки України, Національний університет “Львівська політехніка”. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019. – 335 с.
4. Бортник Г.Г. Напрямні телекомунікаційні системи: лабораторний практикум / Г.Г. Бортник, М.В. Васильківський, В.М. Кичак; ВНТУ. – Вінниця: ВНТУ, 2021. – 104 с.
5. Гусєв О. Ю., Конахович Г. Ф., Корнієнко В. І., Кузнецов Г. В., Пузиренко О. Ю. Теорія електричного зв’язку: Навч. посібник. – Львів: Магнолія 2006, 2025. – 364 с.
6. Основи теорії телекомунікацій / [Корнейко О.В., Кувшинов О.В., Лежнюк О.П., Лівенцев С.П. і др.] за заг. ред. М.Ю. Ільченка. – Київ: Вид-во ІСЗЗІ НТУУ “КПІ”, 2010. – 788 с.