

Міністерство освіти і науки України  
Луцький національний технічний університет



## ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Методичні вказівки до практичних занять  
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти  
освітньої програми «Комп'ютеризовані телекомунікаційні мережі»  
галузі знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації  
спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка  
денної та заочної форм навчання

Луцьк 2024

УДК 621.391(07)

Т – 33

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозитарій ЛНТУ

Директор бібліотеки \_\_\_\_\_ Світлана БАКУМЕНКО

Рекомендовано до видання вченою радою факультету комп'ютерних та інформаційних технологій ЛНТУ, протокол № \_\_ від « \_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 року.

Голова вченої ради ФКІТ \_\_\_\_\_ Інна КОНДІУС

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ, протокол № \_\_ від « \_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 року.

Завідувач кафедри ЕіТК \_\_\_\_\_ Валентин ЗАБЛОЦЬКИЙ

Укладачі: \_\_\_\_\_ Наталія ЯКИМЧУК к.т.н., асистент кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ  
\_\_\_\_\_ Микола ЄВСЮК к.т.н., доц. кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ

Рецензент: \_\_\_\_\_ Віктор ЛИШУК к.т.н., доц. кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ

Відповідальний за випуск: \_\_\_\_\_ Валентин ЗАБЛОЦЬКИЙ к.т.н., доц., завідувач кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ

Т - 33 Теорія електричного зв'язку. Методичні вказівки до практичних занять для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Комп'ютеризовані телекомунікаційні мережі» галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації, спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка, всіх форм навчання / уклад. Н.М. Якимчук, М.М. Євсюк. Луцьк: ЛНТУ, 2024. 42 с.

Видання містить основні теоретичні положення, приклади розрахунку типових задач та завдання для самостійного опрацювання з дисципліни «Теорія електричного зв'язку». Призначене для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Комп'ютеризовані телекомунікаційні мережі».

Н.М. Якимчук, , М. М. Євсюк, 2024

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
1. Практична робота №1 Визначення параметрів сигналів в елементах електрозв'язку.....	5
2. Практична робота №2 Кількісна оцінка інформації в системах електрозв'язку.....	11
3. Практична робота №3 Статистичні характеристики сигналів.....	18
4. Практична робота №4 Кореляційні характеристики випадкових процесів і детермінованих сигналів.....	22
5. Практична робота № 5 Дослідження спектрів імпульсних сигналів.....	28
6. Практична робота № 6 Дослідження параметрів дискретизації аналогових сигналів.....	31
7. Практичне заняття № 7 Розрахунок ефективності цифрової системи передачі..... Література.....	35 41

## ВСТУП

Сучасні системи електричного зв'язку постійно та стрімко розвиваються. Широке застосування знаходять мобільні та волоконно-оптичні системи зв'язку, характеристики яких постійно вдосконалюються, у тому числі за рахунок застосування нових видів сигналів та методів їх обробки. Допомогти сучасному спеціалісту в галузі телекомунікацій орієнтуватися в цих питаннях може гарне знання основ теорії електричного зв'язку.

Теорія електричного зв'язку належить до фундаментальних дисциплін підготовки інженерів-зв'язківців різного профілю, і має на меті сформувати знання основ теорій передачі та кодування повідомлень, методів передачі та прийому дискретних та безперервних повідомлень, цифрової обробки, принципів побудови багатоканальних систем передачі та методів підвищення ефективності систем електрозв'язку, а також умінь використовувати методи аналізу систем електричного зв'язку для кількісної оцінки їхньої ефективності.

Предметом вивчення дисципліни є закономірності процесів перетворення та передачі в системах електрозв'язку.

Знання та вміння з дисципліни є складовою загальнопрофесійної підготовки до самостійної інженерно-експлуатаційної діяльності.

У навчальному посібнику викладено основні теоретичні положення, приклади розрахунку типових задач та завдання для самостійного виконання, опрацювання яких необхідне для успішного засвоєння курсу «Теорія електричного зв'язку».

## ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛІВ В ЕЛЕМЕНТАХ ЕЛЕКТРОВ'ЯЗКУ

Мета: набуття навичок розрахунку параметрів сигналів в елементах систем електров'язку

### Теоретичні відомості

Як, відомо, виробничі процеси, як і будь-які інші, пов'язані з одержанням, передаванням, перетворенням, накопиченням, зберіганням та відображенням інформації.

Зазвичай під інформацією розуміють нові відомості про навколишній світ, які ми одержуємо в результаті взаємодії з ним та зміни його в процесі адаптації.

*Інформація* – це відомості, які є об'єктом збереження, передавання та перетворення. Інформація – це, перш за все, відомості, що повинні бути використані.

Під повідомленням розуміють інформацію, що виражена у деякій формі та підлягає передаванню. *Повідомлення* – це форма представлення інформації.

Для передачі за відповідною адресою повідомлення повинно бути попередньо перетворене в сигнал. Під сигналом розуміють фізичну величину, що змінюється та відображує повідомлення. *Сигнал* – це матеріальний переносник повідомлення. В сучасній техніці знайшли застосування електричні, електромагнітні, світлові, механічні, звукові, ультразвукові сигнали.

Фізичне середовище, по якому відбувається передавання сигналів від передавача до приймача, називається *лінією зв'язку*.

Для передавання повідомлень необхідно застосовувати носій, здатний ефективно розповсюджуватись в системі лінії зв'язку, що використовується. Сигнал є об'єктом транспортування, а техніка зв'язку, по суті, технікою транспортування (передавання) сигналів каналами зв'язку. Тому доцільно визначити параметри сигналу, які є основними з точки зору його передавання.

## Логарифмічні одиниці вимірювання

Для порівняння потужностей сигналів, що передаються системою електрозв'язку, часто використовують логарифмічні одиниці вимірювання – децибелі (дБ, dB). Децибел складає десяту частину іншої одиниці, Бел, що названа на честь А. Г. Белла – винахідника телефону. Бел – це десятковий логарифм відношення двох потужностей. Для практики бел – надто велика величина, тому якщо відомі дві потужності:  $P_1$  та  $P_2$ , то їх відношення, виражене в децибелах, визначається формулою:

$$p = 10 \lg(P_2/P_1). \quad (1.1)$$

Фізична природа потужностей, що порівнюються, може бути будь-якою – електричною, електромагнітною, акустичною. Важливо, щоб обидві величини були виражені в однакових величинах – ватах, міліватах тощо.

Порівняння двох сигналів шляхом співставлення їх потужностей не завжди буває зручним. На практиці при роботі з телекомунікаційним обладнанням буває простіше виміряти не потужність, яка виділяється на навантаженні, а падіння напруги на ній, а в деяких випадках – струм. Якщо виразити потужність через напруги або струми та опори і враховуючи рівності опорів  $R_1$  та  $R_2$ , то одержимо:

$$p = 20 \lg(U_2/U_1) = 20 \lg(I_2/I_1). \quad (1.2)$$

Якщо у якості умовного рівня порівняння задати деяку незмінну потужність  $P_0$ , то іншому значенню потужності  $P$  буде відповідати визначена кількість децибел:

$$p = 10 \lg(P/P_0). \quad (1.3)$$

Найчастіше за нульовий рівень обирають потужність, що дорівнює 1 мВт, яка розсіюється на опорі 600 Ом. Децибелі, що визначаються відносно цього рівня, називають децибел-міліваттами і позначають дБм або dBm.

## Тривалість сигналу $T_C$

Будь-який сигнал, що розглядається як процес у часі, має початок та закінчення. Тому *тривалість сигналу* є його природнім параметром, який визначає інтервал часу, в межах якого цей сигнал існує.

## Динамічний діапазон сигналу $D_C$

*Динамічний діапазон* – це відношення найбільшого миттєвого параметру сигналу (потужності, напруги, струму) до найменшого параметру, який необхідно відрізнити від нуля при заданій якості передавання. Як правило, він виражається в логарифмічних одиницях – децибелах.

$$D_C = 10 \lg(P_{max}/P_{min}) = 20 \lg(U_{max}/U_{min}) = 20 \lg(I_{max}/I_{min}) \quad (1.4)$$

Наприклад, динамічний діапазон мовлення диктора складає 25 ... 30 дБ, симфонічного оркестру – 70 ... 95 дБ. Щоб уникнути перевантажень каналу в радіомовленні динамічний діапазон часто скорочують до 35...45 дБ.

*Пік-фактором* сигналу називають відношення його максимальної потужності до середньої. В логарифмічних одиницях:

$$Q = 10 \lg(P_{max}/P_{cp}). \quad (1.5)$$

### Ширина спектру сигналу $\Delta F_C$

Цей параметр надає уявлення про швидкість зміни сигналу всередині інтервалу його існування. Спектр сигналу, по суті, може бути необмеженим. Однак для будь-якого сигналу можна вказати діапазон частот, в межах якого зосереджена його енергія. Цим діапазоном і визначається *спектр сигналу* і визначається як різниця частот верхнього і нижнього діапазонів:

$$\Delta F_C = F_v - F_n. \quad (1.6)$$

В техніці зв'язку спектр сигналу часто свідомо скорочують. Це пояснюється тим, що апаратура і лінії зв'язку мають обмежену ширину смуги пропускання. Звуження спектру сигналу відбувається з урахуванням допустимих спотворень.

### Об'єм сигналу $V_C$

Спектр модульованого сигналу зазвичай ширший за спектр повідомлення, що передається (первинного сигналу), і залежить від виду модуляції. Можна ввести більш загальну характеристику – об'єм сигналу:

$$V_C = T_C F_C D_C. \quad (1.7)$$

Об'єм сигналу  $V_C$  надає загальне уявлення про можливості даної множини сигналів як носіїв повідомлень. Чим більший об'єм сигналу, тим більше інформації можна «вкласти» в його і тим важче передати такий сигнал каналом зв'язку.

### Параметри каналів зв'язку

За аналогією з сигналами, канал зв'язку, застосовуваний для передавання сигналів, характеризують наступними основними параметрами: часом роботи каналу зв'язку  $T_k$ , смугою частот пропускання каналів зв'язку  $\Delta F_k$  і динамічним діапазоном  $D_k$  (перевищенням середньої потужності сигналу над середньою потужністю завад на виході каналу зв'язку):

$$D_k = \log(P/P_z). \quad (1.8)$$

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

$$V_k = T_k F_k D_k . \quad (1.9)$$

Основна умова узгодження каналу зв'язку з сигналом, виконання якої забезпечує можливість неспотвореного сигналу, така: повідомлення має бути перетворене в сигнал так, щоб об'єм сигналу в тривимірному просторі  $T, \Delta F, D$  відповідав об'єму каналу в тому самому тривимірному просторі, тобто: час передавання сигналу має збігатися з часом роботи каналу зв'язку; смуга частот сигналу має збігатися зі смугою частот каналу зв'язку; динамічні діапазони на вході і виході каналу зв'язку мають дорівнювати один одному, Тільки в цьому випадку канал зв'язку може забезпечити неспотворене передавання сигналу.

Якщо об'єм сигналу менший за об'єм каналу зв'язку або дорівнює йому, тоді завжди можна здійснити таке перетворення сигналу, при якому виконуватимуться ці мови. Отже, умова можливості узгодження сигналу і каналу зв'язку:

$$V_k \geq V_c . \quad (1.10)$$

Відношення величин називається *резервом ємності каналу зв'язку*:

$$r_k = V_k / V_c \quad (1.11)$$

Резерв ємності каналу зв'язку характеризує можливості підвищення надійності каналу зв'язку.

### Практичні завдання

Завдання 1. Визначити відношення двох потужностей сигналів  $P_1$  і  $P_2$ , що передаються системою електрозв'язку в децибелах.

Таблиця 1.1

Вихідні дані для розрахунку задачі 1

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_1$ , мВт	9	12	15	20	24	26	28	30	34	36
$P_2$ , мВт	42	48	60	64	72	80	90	100	120	140
$I_1$ , мА	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0
$I_2$ , мА	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115
$U_1$ , В	0,9	0,8	0,75	0,8	0,8	0,75	0,7	0,67	0,68	0,66
$U_2$ , В	0,6	0,64	0,75	0,75	0,8	0,84	0,8	0,95	1,1	1,23

Завдання 2. Нехай сигнал  $P_{ex}$  – вхідний сигнал лінії електрозв’язку. Визначити значення вихідного сигналу лінії в дБ та мВт, якщо канал передачі вносить згасання  $L$  та містить підсилювач сигналу з підсиленням  $G$ .

Таблиця 1.2

Вихідні дані для розрахунку задачі 2

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_1$ , мВт	90	120	150	200	240	260	280	300	340	360
$L$ , дБ	10	20	30	10	20	30	10	20	30	40
$G$ , дБ	5	25	50	75	5	25	50	75	25	50

Завдання 3. Визначити динамічний діапазон та пік-фактор сигналу радіомовлення в логарифмічних одиницях – децибелах за відомих потужностей сигналів  $P_{max}$  і  $P_{min}$ , що передаються системою електрозв’язку).

Таблиця 1.3

Вихідні дані для розрахунку задачі 3

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{max}$ , мкВт	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
$P_{min}$ , мкВт	0,6	0,62	0,65	0,68	0,7	0,72	0,75	0,78	0,8	0,82

Завдання 4. Визначити ширину спектру інформаційного сигналу  $\Delta F_c$ , якщо відомо смугу частот нижнього  $F_H$  і верхнього діапазонів  $F_B$ . Використовуючи результати обчислень динамічного діапазону в завданні 3 знайти обсяг інформаційного сигналу  $V_C$  заданої тривалості сигналу  $T_C$ .

Таблиця 1.4

Вихідні дані для розрахунку задачі 4

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$F_H$ , Гц	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
$F_B$ , кГц	3,4	3,6	3,85	4,0	4,25	4,4	4,6	4,75	4,8	5,20
$T_C$ , мсек	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75

Завдання 5. Розмовне повідомлення тривалістю  $t_p$  необхідно передати протягом заданого часу  $t_n$ . Визначити смугу частот каналу зв’язку, якщо

розмовний сигнал займає смугу в діапазоні 300...3400Гц, а динамічні діапазони сигналу і каналу рівні.

Таблиця 1.5

Вихідні дані для розрахунку задачі 5

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_{п}$ , сек	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
$t_{р}$ , хв	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

### Контрольні запитання

1. Дайте визначення інформації, повідомлення, сигналу в системах телекомунікацій.
2. Що таке лінія зв'язку?
3. Наведіть логарифмічну формулу для визначення відношення потужностей сигналу. Вкажіть одиниці вимірювання.
4. Дайте визначення тривалості сигналу.
5. Що таке динамічний діапазон? Як він визначається залежно від параметру сигналу?
6. Що таке пік-фактор сигналу? Наведіть розрахункову формулу.
7. Дайте визначення ширини спектру сигналу та наведіть розрахункову формулу.
8. Що таке об'єм сигналу? Вкажіть умову узгодження каналу зв'язку з сигналом.

## КІЛЬКІСНА ОЦІНКА ІНФОРМАЦІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОВЗ'ЯЗКУ

Мета: набуття навичок розрахунку кількісного оцінювання інформації в системах електров'язку

### Теоретичні відомості

Дискретне джерело повідомлень за одиницю часу створює одне з  $n$  можливих повідомлень  $a_1, a_2, \dots, a_n$ . Множина  $X = \{a_1, \dots, a_n\}$  називається дискретною множиною повідомлень або просто множиною повідомлень  $X$ .

Таким чином, дискретне джерело за одиницю часу створює певне повідомлення  $a_i$  з множини  $X$  з імовірністю  $P(a_i)$  з множини  $P$ .

Кількість інформації для заданих імовірностей, біт:

$$I(x) = \log_2 \frac{1}{P(x)} = -\log_2 P(x), \text{ при чому } \log_2 x = \frac{\log x}{\log 2} = \frac{\ln x}{\ln 2} \quad (2.1)$$

де  $P(x)$  - ймовірність появи символів.

Таким чином ще одне формування закону Хартлі таке: кількість інформації рівна логарифму ймовірності повідомлення з протилежним знаком.

Якщо ймовірності повідомлень  $P$  не є рівною, тобто при формуванні повідомлень враховуються їх певна статистична структура, тоді кожний символ у повідомленні володіє ймовірністю  $P_i$ . Шенон вводить поняття про середню інформацію на одне повідомлення  $\bar{I}(X)$ , тобто ентропію:

$$\bar{I}(x) = -n \sum_{i=1}^N P(x_i) \log P(x_i) \quad (2.2)$$

де  $n$  – кількість розрядів повідомлення.

Ентропія джерела повідомлень  $H(x)$ , або середня кількість інформації  $\bar{I}(X)$ , біт/повідомлення:

$$H(x) = \bar{I}(x) = \sum_{i=1}^N P(x_i) \cdot I(x_i) \quad (2.3)$$

де  $N$  – кількість символів в ансамблі повідомлень.

Збитковість джерела інформації:

$$S = \frac{H_{\max}(x) - H(x)}{H_{\max}(x)} = 1 - \frac{H(x)}{H_{\max}(x)} = 1 - \frac{H(x)}{\log_2(x)} \quad (2.4)$$

Збитковість джерела інформації залежить від протяжності статистичних зв'язків між символами, що послідовно обираються (пам'яттю джерела), так і від ступені нерівномірності окремих символів.

Типовим прикладом двох джерел повідомлень є: джерело А, що діє на вході каналу зв'язку, та вихід цього каналу зв'язку – джерело В. Спостерігаємо повідомлення з виходу каналу (з джерела В), а інформацію маємо отримати про джерело А.

За термінологією два стаціонарні джерела А та В мають об'єднаний ансамбль АВ і видають дискретні повідомлення  $a_k$  та  $b_j$ .

Ентропія взаємна двох джерел повідомлень А та В – середня кількість інформації на одне повідомлення джерела А, що можна отримати, спостерігаючи повідомлення джерела В.

Ентропія спільна двох джерел повідомлень А та В – середня кількість інформації на одне повідомлення об'єднаного ансамблю АВ двох джерел А та В з урахуванням статистичної залежності між ними.

Ентропія умовна джерела А (чи В) – середня кількість інформації в одному повідомленні джерела А (чи В) за умови, що відомі повідомлення джерела В (чи А).

Продуктивність двох джерел дискретних повідомлень А та В – швидкість видачі інформації об'єднаним ансамблем АВ двох джерел, яка обчислюється за спільною ентропією.

Швидкість передавання інформації між двома джерелами А та В – швидкість обміну інформацією між джерелами А та В, яка обчислюється за взаємною ентропією.

Статистичні характеристики двох джерел повідомлень такі:

- $P(a_k)$  та  $P(b_j)$ , – апіорні(безумовні) імовірності знаків  $a_k$  та  $b_j$  ;
- $P(a_k/b_j)$ , – апостеріорні (умовні) імовірності знаків  $a_k$  джерела А, якщо мав місце знак  $b_j$  джерела В;
- $P(a_k, b_j) = P(a_k)P(b_j/a_k) = P(b_j)P(a_k/b_j)$  – спільні ймовірності знаків  $a_k$  та  $b_j$ ;
- $T_k$  і  $T_j$  – тривалості видачі знаків  $a_k$  та  $b_j$  джерелами;
- $\bar{T} = T = \sum_k T_k P(a_k)$  – середня тривалість повідомлення (знаку),

обчислюється як математичне сподівання тривалості повідомлень.

Розрахункові формули інформаційних характеристик двох джерел дискретних повідомлень

Найменування характеристики	Розрахункова формула
Умовна кількість інформації в повідомленні (знаку) $a_k$ чи $b_j$ об'єднаного ансамблю $AB$ двох джерел дискретних повідомлень $A$ і $B$ , дв.од. (біт)	$I(a_k / b_j) = -\log_2 P(a_k / b_j)$ $I(b_j / a_k) = -\log_2 P(b_j / a_k)$
Умовна ентропія двох джерел повідомлень $A$ і $B$ чи $B$ і $A$ , дв.од. (біт)	$H(A / B) = \overline{I(a_k / b_j)}$ $H(B / A) = \overline{I(b_j / a_k)}$
Спільна кількість інформації в повідомленнях (знаках) $a_k$ та $b_j$ об'єднаного ансамблю $AB$ двох джерел повідомлень $A$ та $B$ , дв.од. (біт)	$I(a_k, b_j) = -\log_2 P(a_k, b_j)$ $I(b_j, a_k) = -\log_2 P(b_j, a_k)$
Спільна ентропія об'єднаного ансамблю $AB$ двох джерел повідомлень $A$ та $B$ , дв.од./знак (біт/знак)	$H(A, B) = H(A) + H(B / A) =$ $= H(B) + H(A / B)$
Взаємна ентропія об'єднаного ансамблю $AB$ двох джерел повідомлень $A$ та $B$ , дв.од./знак (біт/знак)	$H_{\text{в}}(A, B) = H(A) - H(A / B) =$ $= H(B) - H(B / A)$
Продуктивність об'єднаного ансамблю $AB$ двох джерел повідомлень $A$ та $B$ , дв.од./с (біт/с)	$R_{\text{вк}}(A, B) = H(A, B) / \bar{T}$
Швидкість передавання інформації від джерела повідомлень $A$ до джерела $B$ чи від джерела повідомлень $B$ до джерела $A$ , дв.од./с (біт/с)	$R_{\text{в}}(A, B) = H_{\text{в}}(A, B) / \bar{T}$

Дисперсія випадкової величини - це один з параметрів розподілу ймовірностей, що характеризує міру розсіювання значень випадкової величини відносно середнього значення розподілу:

$$D(I) = \sum_{i=1}^N \left( I(x_i) - \bar{I}(x) \right)^2 \cdot P(x_i) \quad (2.5)$$

Середнє квадратичне відхилення дисперсії випадкової величини

$$\sigma_i = \sqrt{D(I)} \quad (2.6)$$

Диференційна ентропія джерела інформації:

$$H_{\Delta}(X) = - \int_{-\infty}^{+\infty} W(x) \log W(x) dx \quad (2.7)$$

Відносна диференційна умовна ентропія інформації:

$$H_{\Delta}(X/Y) = - \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W(x,y) \log \frac{W(x,y)}{W(y)} dx dy \quad (2.8)$$

Кількість інформації, яка міститься в одній неперервній випадковій величині, відносно іншої:

$$I(X,Y) = H_{\Delta}(X) - H_{\Delta}(X/Y) = - \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W(x,y) \log \frac{W(x,y)}{W(x)W(y)} dx dy \quad (2.9)$$

де  $x=(x_1, \dots, x_n)$ ,  $y=(y_1, \dots, y_n)$  – послідовності символів з відповідних алфавітів, що мають довільну, але однакову довжину  $n$ .

Епсілон-ентропія інформації:

$$H(X)_{\varepsilon} = \min I(X,Y) = H_{\Delta}(X) - \max H_{\Delta}(X/Y) \quad (2.10)$$

де  $X, Y$  – два алфавіти на вході і виході каналу.

Епсілон-ентропія для одного незалежного відліку при гаусівському процесі  $X(t), E(t)$ :

$$H(X)_{\varepsilon} = 0,5 \log \left( \frac{\sigma_C^2}{\sigma_E^2} \right) \quad (2.11)$$

$\sigma_C^2, \sigma_E^2$  – середньоквадратичне значення дисперсії сигналу і шуму відповідно.

Епсілон-продуктивність джерела при дискретному часі:

$$H'(X)_{\varepsilon} = V_{\tau} H(X)_{\varepsilon} = V_{\tau} (H_{\Delta}(X)) - \log \sqrt{2\pi e \varepsilon_0^2}, \text{ біт/с} \quad (2.12)$$

де  $X_2$  – швидкість передачі звітів;  $\Delta F = \frac{V_{\tau}}{2}$  – смуга частот сигналу  $X(t)$ .

Максимальне значення епсілон-продуктивності має місце, коли сигнал  $X(t)$  є гаусівським:

$$\max H'(X)_\varepsilon = \Delta F \log \left( \frac{\sigma_c^2}{\varepsilon_0^2} \right) \quad (2.13)$$

$\varepsilon_0^2$  – максимальна потужність перешкоди (завади).

Об'єм інформації, яка видається джерелом, за час  $T$ :

$$\max V = \max H'(X)_\varepsilon \cdot T = \Delta F \cdot T \cdot \log \left( \frac{\sigma_c^2}{\varepsilon_0^2} \right), \text{ біт} \quad (2.14)$$

Надлишковість джерела інформації:

$$R_x = 1 - \frac{H_\Delta(X) - \log \sqrt{2\pi e \varepsilon_0^2}}{0,5 \log \left( \frac{\sigma_c^2}{\varepsilon_0^2} \right)} \quad (2.15)$$

### Практичні завдання

Завдання 1. Джерело повідомлень видає символи  $X$  із ансамблю  $A = \{a_i\}, (i=1...5)$  з відомими ймовірностями  $P(a_i)$ . Знайти кількість інформації, що міститься в кожному символі джерела при їх незалежному виборі (тобто джерело без пам'яті), ентропію джерела повідомлень та збитковість даного джерела інформації.

Таблиця 1

Вихідні дані для розрахунку завдання 1

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P(a_1)$	0,2	0,4	0,5	0,3	0,25	0,32	0,24	0,15	0,18	0,1
$P(a_2)$	0,3	0,12	0,1	0,12	0,2	0,25	0,16	0,2	0,24	0,25
$P(a_3)$	0,15	0,18	0,15	0,25	0,16	0,16	0,13	0,25	0,32	0,15
$P(a_4)$	0,25	0,14	0,12	0,13	0,18	0,14	0,32	0,23	0,16	0,2
$P(a_5)$	0,1	0,16	0,13	0,2	0,21	0,13	0,15	0,17	0,1	0,3

Завдання 2. Джерело повідомлень  $X$  має три результати  $x_1, x_2, x_3$  з відповідними ймовірностями  $P(x_1), P(x_2), P(x_3)$ . Знайти кількість інформації та середню кількість інформації, які виходять з  $x_1, x_2, x_3$ . Обчислити дисперсію випадкової величини і величину відхилення від свого середнього значення.

Таблиця 2

Вихідні дані для розрахунку завдання 2

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P(x_1)$	0,22	0,34	0,26	0,28	0,3	0,32	0,18	0,51	0,46	0,37
$P(x_2)$	0,34	0,45	0,36	0,42	0,43	0,53	0,29	0,41	0,32	0,27
$P(x_3)$	0,44	0,21	0,38	0,3	0,37	0,14	0,47	0,08	0,24	0,36

Завдання 3. Телевізійний кадр має 625 рядків, в кожній стрічці 833 елементи, кожен із яких має 16 градацій яскравості. Кадр має  $I(A)$  Біт інформації. Знайти збитковість телевізійного кадру.

Таблиця 3

Вихідні дані для розрахунку завдання 3

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I(A) \cdot 10^5$	4,15	6,25	7,38	8,25	9,15	4,8	5,86	6,8	7,85	9,65

Завдання 4. Джерело повідомлень видає 4 повідомлення з відомими ймовірностями  $P(a_1)$ ,  $P(a_2)$ ,  $P(a_3)$ . Знайти ймовірність  $P(a_4)$ , кількість інформації, що міститься в кожному символі джерела при їх незалежному виборі (тобто джерело без пам'яті), ентропію джерела повідомлень та збитковість даного джерела інформації.

Таблиця 4

Вихідні дані для розрахунку завдання 4

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P(a_1)$	0,15	0,3	0,25	0,3	0,25	0,32	0,24	0,15	0,18	0,1
$P(a_2)$	0,2	0,15	0,16	0,16	0,12	0,18	0,12	0,32	0,2	0,25
$P(a_3)$	0,1	0,5	0,2	0,25	0,13	0,16	0,24	0,25	0,4	0,15

Завдання 5. Два джерела повідомлень А і В мають ентропії, дв.од./знак:  $H(A)$ ;  $H(A/B)$ ;  $H(B)$ ;  $H(B/A)$ . Обчислити ентропію повідомлень, позначену «х», спільну  $H(A,B)$  та взаємну  $H_{\text{вз}}(A,B)$  ентропії, продуктивність об'єднаного ансамблю АВ двох джерел повідомлень  $R_{\text{дж}}(A,B)$  та швидкість передачі інформації  $R_{\text{вз}}(A,B)$  між ц и м и двома джерелами. Дані для розрахунку наведені у таблиці 5.

Вихідні дані для розрахунку завдання 5

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$H(A)$	6,4	7,5	6,6	8,2	7,0	5,6	7,2	5,7	6,8	5,8
$H(A/B)$	2,4	x	3,2	x	3,3	x	2,6	x	3,0	x
$H(B)$	6,8	7,6	6,9	8,3	7,4	6,2	7,5	5,2	7,2	6,2
$H(B/A)$	x	3,5	x	2,0	x	2,1	x	2,2	x	2,3
$T, мкс$	100	150	200	250	300	350	400	450	500	300

### Контрольні запитання

1. Як визначається кількість інформації для заданих імовірностей? Вкажіть одиниці виміру інформації
2. Сформулюйте закон Хартлі для визначення кількості інформації.
3. Сформулюйте формулу Шенона для визначення середньої кількості інформації.
4. Дайте визначення ентропії джерела повідомлень  $H(x)$ ?
5. Що розуміють під збитковістю джерела інформації? Як вона визначається?
6. Що дисперсія випадкової величини? Як вона визначається?
7. Що розуміють під середньоквадратичною величиною дисперсії випадкової величини? Як вона визначається?
8. Як визначається епсілон-ентропія інформації?

## СТАТИСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛІВ

Мета: набуття навичок розрахунку статистичних параметрів випадкових сигналів в елементах систем електрозв'язку

### Теоретичні відомості

Реальні сигнали електрозв'язку не можуть бути описані математичною функцією часу з повною визначеністю. Це природно, оскільки в цілому передавання повідомлення в системі електрозв'язку являє собою випадковий процес, що підпорядковується законам теорії ймовірностей. Наприклад, чергування літер в тексті телеграми або звуків в мовленні є випадковим і заделегіть невідоме одержувачу. Відповідно можна оперувати лише імовірністю появи в кожний момент часу того чи іншого значення сигналу. При такому підході об'єктом вивчення стають не характеристики конкретного сигналу, а імовірнісні статистичні характеристики сукупності сигналів електрозв'язку того чи іншого виду.

Вважаємо, що процеси, які досліджуються – стаціонарні й ергодичні. В таких процесів одновимірні функції розподілу ймовірностей і густина ймовірності не залежать від часу.

За визначенням значення *одновимірної функції розподілу ймовірностей*

$F(x)$  це імовірність того, що в довільний момент часу процес  $X(t)$  прийме значення, що не перевищує  $x$ :

$$F(x) = P\{X(t) \leq x\}. \quad (3.1)$$

Значення *одновимірної густини ймовірності процесу*  $p(x)$  дорівнює границі відношення ймовірності того, що в довільний момент часу процес  $X(t)$  прийме значення на інтервалі  $(x - \Delta x / 2, x + \Delta x / 2)$ , до довжини інтервалу  $\Delta x$ , де  $\Delta x$  прямує до 0:

$$p(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P\{x - \Delta x / 2 < X(t) \leq x + \Delta x / 2\}}{\Delta x} \quad (3.2)$$

Функції  $F(x)$  та  $p(x)$  використовуються для обчислення ймовірності попадання значень процесу в заданий інтервал, а також для виконання статистичного усереднення при визначенні характеристик процесу.

Властивості функцій  $F(x)$  та  $p(x)$ 

	$p(x)$	$F(x)$
1	$P\{x < X(t) \leq x + dx\} = p(x)dx$	$F(x) = P\{X(t) \leq x\}$
2	$P\{x_1 < X(t) \leq x_2\} = \int_{x_1}^{x_2} p(x)dx$	$P\{x_1 < X(t) \leq x_2\} = F(x_2) - F(x_1)$
3	$\int_{-\infty}^{\infty} p(x)dx = 1$	$F(\infty) = 1; \quad F(-\infty) = 0$
4	$p(x) \geq 0$	$F(x_2) \geq F(x_1)$ при $x_2 > x_1$
5	$p(x) = \frac{dF(x)}{dx}$	$F(x) = \int_{-\infty}^x p(x)dx$

## Усереднені характеристики сигналу

Середнє значення (постійна складова) визначається виразом:

$$s_{cep} = \bar{s}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s \cdot p(s, t) ds \quad (3.3)$$

Дисперсія – середнє значення квадрата відхилень значень випадкового процесу від його середнього значення:

$$D[s(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} (s - \bar{s})^2 \cdot p(s, t) ds \quad (3.4)$$

Середня потужність, яку розвиває випадковий сигнал  $s(t)$  на резисторі опором 1 Ом в момент  $t$  визначається виразом

$$P_{cep} = \overline{s^2(t)} = \int_{-\infty}^{\infty} s^2 \cdot p(s, t) ds \quad (3.5)$$

**Практичні завдання**

Завдання 1. Необхідно розрахувати і побудувати характеристики ймовірнісної математичної моделі часового представлення гармонічного сигналу  $s(t)$  початкова фаза якого є випадковою величиною, значення якої рівномірно розподілені на інтервалі від  $-\pi$  до  $+\pi$ :

$$s(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi),$$

де  $U_m$  і  $\omega$  – амплітуда і частота, які мають постійне значення (таблиця 3.2);  $\varphi$  – початкова фаза, що є випадковою величиною.

Визначіть середнє значення, середню потужність і середню потужність відхилення відносно середнього значення випадкового сигналу  $s(t)$ .

Таблиця 3.2

Вихідні дані для розрахунку задачі

Варіант	$U_m, \text{В}$	$f, \text{кГц}$	$m, \text{В}$	$\sigma, \text{В}$	$U_{\text{пор}}, \text{В}$	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$
1	2,8	10,0	+0,8	1,6	-1,0	+0,8	+1,2
2	1,2	6,5	-1,2	0,6	+0,2	0	-0,6
3	1,8	1,5	+1,8	0,9	-0,5	+1,5	+1,8
4	2,6	2,4	+0,6	1,2	-1,0	+0,8	+1,5
5	1,0	3,0	-1,0	2,0	+3,0	+1,5	+2,5
6	2,2	5,5	+0,2	0,4	+0,8	-0,2	-0,6
7	1,5	6,0	-1,5	0,75	-0,5	-1,5	+0,75
8	2,3	8,2	+0,3	0,6	+0,5	+0,3	+2,1
9	1,9	7,4	-1,9	0,95	-1,0	-0,5	-1,0

Завдання 2. Розрахувати і побудувати характеристики ймовірнісної математичної моделі флуктуаційної завади  $\varepsilon(t)$ . Для флуктуаційної завади є справедливим нормальний закон розподілу і є відомі параметри: середнє значення  $m$ , ефективна напруга  $\sigma$  (таблиця 3.1).

Для випадкової завади  $\varepsilon(t)$  користуючись характеристиками ймовірнісної математичної моделі нормального розподілу, необхідно визначити:

а) ймовірність того, що випадковий сигнал не перевищує заданий пороговий рівень  $U_{\text{пор}}$ ;

б) ймовірність того, що випадковий сигнал перевищує заданий пороговий рівень  $U_{\text{пор}}$ ;

в) ймовірність того, що випадковий сигнал перебуває в межах  $U_1 < \varepsilon < U_2$ .

### Рекомендації до розв'язання

Функція для щільності (густини) розподілу ймовірностей появи значень неперервного випадкового сигналу  $s(t)$  початкова фаза якого є випадковою величиною визначається за формулою:

$$p(s) = \begin{cases} \frac{1}{\pi\sqrt{u_m^2 - s^2}}, & |s| \leq u_m \\ 0, & |s| > u_m \end{cases}$$

Тоді, функцію розподілу сигналу  $s(t)$  знаходимо за визначенням:

$$F(s) = \int_{-\infty}^u p(s) ds = \int_{-\infty}^u \frac{1}{\pi\sqrt{u_m^2 - s^2}} ds .$$

Знаходимо параметри неперервного випадкового сигналу  $s(t)$  :

$$s_{cep} = \bar{s}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s \cdot p(s, t) ds ,$$

$$P_{cep} = \overline{s^2(t)} = \int_{-\infty}^{\infty} s^2 \cdot p(s, t) ds ,$$

$$P_{cep, \text{вих}} = D[s] = \overline{s^2(t)} - \bar{s}^2(t) .$$

Для неперервного випадкового сигналу  $\varepsilon(t)$  формулу для щільності (густини) розподілу ймовірностей появи його значень вибираємо на підставі умови про те, що він є нормальним, отже функція Гаусса:

$$p(\varepsilon) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(\varepsilon - \bar{\varepsilon})^2}{2\sigma^2}\right) .$$

де  $\bar{\varepsilon}$  - середнє значення неперервного випадкового сигналу;

$\sigma^2$  - дисперсія неперервного випадкового сигналу.

### Контрольні запитання

1. Які процеси називаються стаціонарними, ергодичними?
2. Що таке густина розподілу ймовірностей випадкового процесу? Які її властивості?
3. Що таке функція розподілу випадкового процесу?
4. Дайте визначення параметрів середнє значення сигналу та середня потужність сигналу.

## КОРЕЛЯЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ І ДЕТЕРМІНОВАНИХ СИГНАЛІВ

Мета роботи: вивчення методу експериментального вивчення кореляційних характеристик випадкових процесів і детермінованих сигналів. Дослідження зв'язку між кореляційними функціями і спектрами випадкових процесів і детермінованих сигналів.

### Теоретичні відомості

Кореляційною функцією (КФ) випадкового процесу  $X(t)$  називається математичне сподівання добутку значень процесу, які він приймає в моменти часу  $t_1$  і  $t_2$ :

$$K_X(t_1, t_2) = \overline{X(t_1) \cdot X(t_2)}. \quad (4.1)$$

Значення КФ  $K_X(t_1, t_2)$  визначають величину статистичної залежності між значеннями процесу в моменти часу  $t_1$  і  $t_2$ . У стаціонарних процесів значення КФ залежать не від вибору  $t_1$  і  $t_2$ , а від відстані між ними  $\tau = t_2 - t_1$ , а КФ позначається  $K_X(\tau)$ . Далі будемо розглядати лише стаціонарні процеси і вважати, що вони є ергодичні. Для ергодичних процесів КФ визначається:

$$K_X(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)x(t + \tau) dt \quad (4.2)$$

де  $x(t)$  – реалізація процесу  $X(t)$ .

Незалежно від вигляду КФ різних процесів, для них виконуються наступні властивості:

- $K_X(0) = P_X$ , де  $P_X$  – середня потужність процесу;
- $K_X(0) \geq K_X(\tau)$  – коли  $\tau = 0$ , значення функції  $K_X(\tau)$  максимальне;
- $K_X(\tau) = K_X(-\tau)$  – функція  $K_X(\tau)$  парна;
- $K_X(\infty) \rightarrow \overline{X(t)}^2$ ,  $\overline{X(t)}$  – середнє значення процесу.

Чим менше значення  $K_X(\tau)$  порівняно з  $K_X(0)$ , тим менша статистична залежність між значеннями процесу, які віддалені за часом на  $\tau$ . Якщо значення  $K_X(\tau) = 0$ , то значення процесу  $X(t)$ , які віддалені за часом на такий інтервал  $\tau$ , є некорельованими. Значення  $K_X(\tau)$  і  $K_X(0)$  легше порівнювати, якщо перейти до нормованої кореляційної функції:

$$R_X(\tau) = \frac{K_X(\tau)}{K_X(0)} \quad (4.3)$$

Значення  $R_X(0) = 1$  і  $-1 \leq R_X(\tau) \leq 1$ .

Часто для опису кореляційних властивостей випадкових процесів

замість КФ використовують число – інтервал кореляції  $\tau_k$ . Інтервал кореляції вводить для “грубого” опису кореляційних властивостей процесу, а саме, значення процесу, віддалені на час  $\tau > \tau_k$ , вважають некорельованими, а значення процесу, віддалені на час  $\tau \leq \tau_k$ , вважають корельованими. Використовуються різні способи визначення інтервалу кореляції:

1) Інтервал кореляції  $\tau_k$  є основа прямокутника висоти  $K_X(0)$ , площа якого дорівнює площі під кривою модуля ФК (рис. 3.1, а):

$$\tau_k = \frac{1}{K_X(0)} \int_0^{\infty} |K_X(\tau)| d\tau \quad (4.4)$$

2) інтервалом кореляції є таке значення  $\tau_k$ , що при  $\tau > \tau_k$  значення ФК не перевищують деякого заданого рівня (рис. 3.1, б).

3) Якщо ФК має коливальний характер, то за інтервал кореляції  $\tau_k$  можна прийняти значення  $\tau$ , за якого ФК перший раз приймає нульове значення (рис. 3.1, в).

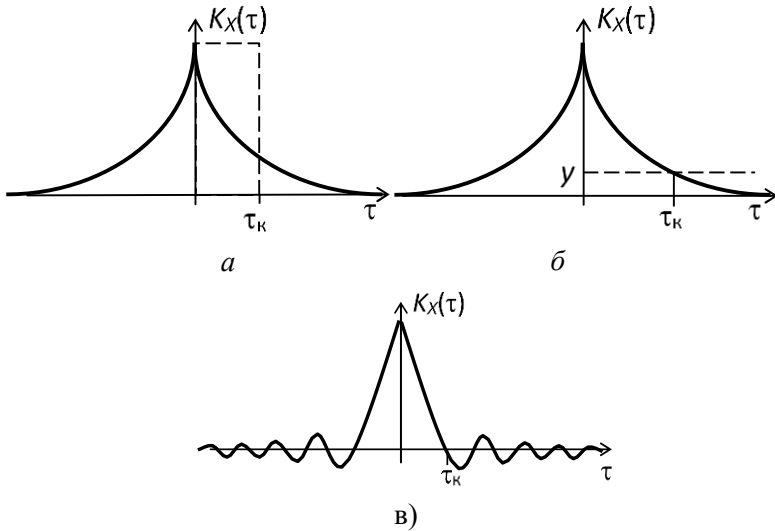


Рисунок 4.1 – Визначення інтервалу кореляції

Виміряти КФ строго відповідно до (4.2) неможливо, оскільки для цього необхідна реалізація процесу нескінченної тривалості. Можна виміряти ФК лише реалізації випадкового процесу скінченної тривалості. Очевидно, чим більша тривалість реалізації процесу  $T_{\text{реал}}$ , тим точніше виміряна КФ реалізації відображує КФ процесу. Пристрій для вимірювання КФ реалізації називається корелометром (рис. 4.2). Тут час затримки  $\tau$  визначає аргумент вимірюваного значення КФ. Якщо корелометр, показаний на рис. 3.2, виконати на процесорі чи на комп’ютері, то можна отримати масив значень

$K_X(kT_d)$ , де  $T_d$  – інтервал дискретизації реалізації процесу  $x(t)$ ; значення аргументу лежать у межах  $-T_{\text{реал}} \leq kT_d \leq T_{\text{реал}}$ . Отримані масиви значень  $kT_d$  і  $K_X(kT_d)$  виводяться на двовимірний дисплей.

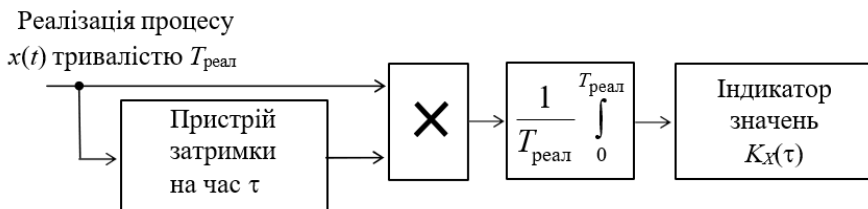


Рисунок 4.2 – Функціональна схема корелометра

Основною спектральною характеристикою випадкових процесів є спектральна густина потужності  $G_X(f)$ , яка визначає розподіл потужності процесу за частотою. Кількісно функція  $G_X(f)$  визначає потужність процесу у смузі частот протяжністю 1 Гц біля частоти  $f$ . Теорема Вінера-Хінчина стверджує, що функції  $K_X(\tau)$  і  $G_X(\omega)$  пов'язані перетворенням Фур'є

$$\left. \begin{aligned} G_X(\omega) &= 2 \int_0^{\infty} K_X(\tau) \cdot \cos(\omega\tau) d\tau; \\ K_X(\tau) &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} G_X(\omega) \cdot \cos(\omega\tau) d\omega. \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

Якщо функція  $G_X(f)$  відома, то за допомогою неї можна визначити середню потужність процесу

$$P_X = \int_0^{\infty} G_X(f) df \quad (4.6)$$

Зокрема, якщо процес – квазібілий шум зі спектральною густиною потужності  $N_0$  у смузі частот  $(0, F_{\text{max}})$ ,

$$P_X = N_0 \cdot F_{\text{max}}. \quad (4.7)$$

Часто досить знати ширину спектра процесу  $F_{\text{max}}$ . Ширина спектра випадкового процесу визначається за функцією  $G_X(f)$  тими ж методами, що і ширина спектра детермінованого сигналу. На рис 4.3 показано, як ширина спектра визначається на за даному рівні  $y$ , тобто  $F_{\text{max}}$  є протяжність області частот, поза якою спектральна густина потужності процесу не перевищує значення  $y$ .

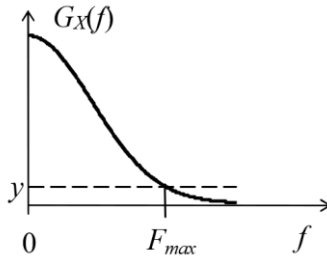


Рисунок 4.3 – Визначення ширини спектру

Оскільки функції  $K_X(\tau)$  і  $G_X(f)$  пов'язані перетворенням Фур'є, то є зв'язок між шириною спектра  $F_{\max}$  і інтервалом кореляції  $\tau_k$  процесу:

$$\tau_k \cdot F_{\max} = 0,5. \quad (4.8)$$

Знак рівності у виразі (4.6) слід розуміти наступним чином – добуток інтервалу кореляції і ширини спектра процесу є величиною порядку 0,5.

Кореляційна функція є також характеристикою детермінованого сигналу, хоча і не має такого тлумачення, як для випадкового процесу. КФ неперіодичного детермінованого сигналу визначається

$$K_S(\tau) = \int_0^{T_s} s(t)s(t+\tau)dt, \quad (4.9)$$

де  $T_s$  – тривалість сигналу  $s(t)$ .

Виміряти КФ детермінованого сигналу можна за допомогою корелометра, наведеного на рис. 4.2, в якому інтегрування ведеться на інтервалі  $(0, T_s)$  і відсутній множник перед інтегралом.

Нехай  $s(t)$  – П-імпульс амплітуди  $A$  і тривалості  $T_i$ :

$$s(t) = \begin{cases} A, & 0 \leq t < T_i \\ 0, & t < 0, t \geq T_i \end{cases} \quad (4.10)$$

Після підстановки (3.10) в (3.9) отримаємо:

$$K_S(\tau) = \begin{cases} A^2 T_i (1 - |\tau|/T_i), & |\tau| \leq T_i \\ 0, & |\tau| > T_i \end{cases} \quad (4.11)$$

КФ П-імпульса показана на рис. 4.4, а.

Із виразу (4.7) видно, що  $K_S(0) = E_s$  – енергії сигналу  $s(t)$ . Перетворення Фур'є від  $K_S(\tau)$  дає квадрат амплітудного спектра (спектральну густину енергії) сигналу  $s(t)$ . Перетворення Фур'є від виразу (4.11) дає квадрат відомого виразу для амплітудного спектра П-імпульсу:

$$S^2(f) = \left( \frac{\sin(\pi f T_i)}{\pi f T_i} \right)^2, \quad -\infty < f < \infty \quad (4.12)$$

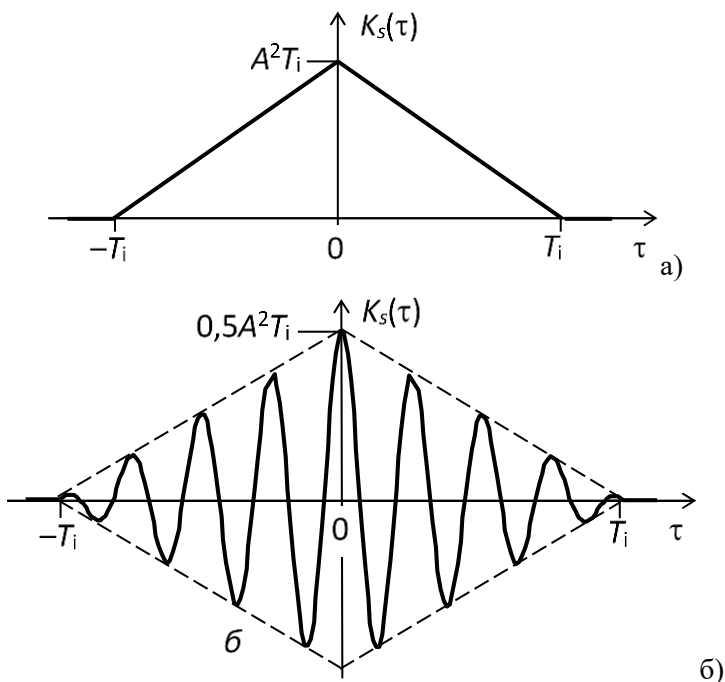


Рисунок 4.4 – Кореляційні функції: *a* – П-імпульсу, *б* – радіоімпульсу

Розглянемо радіоімпульс з П-подібною обвідною тривалості  $T_i$ :

$$s(t) = \begin{cases} A \sin(2\pi f_0 t + \phi_0), & 0 \leq t \leq T_i, \\ 0, & t < 0, \quad t \geq T_i, \end{cases} \quad (4.13)$$

де  $A$ ,  $f_0$  і  $\phi_0$  – амплітуда, частота і початкова фаза коливання.

Після підстановки (4.13) в (4.9) отримаємо

$$K_s(\tau) = \begin{cases} 0,5A^2 T_i (1 - |\tau|/T_i) \cos 2\pi f_0 \tau, & |\tau| \leq T_i, \\ 0, & |\tau| > T_i, \end{cases} \quad (4.14)$$

Із формули (4.14) випливає, що КФ радіоімпульсу є косинусоїда з нульовою початковою фазою і не залежить від фази радіоімпульсу. Тому, якщо початкова фаза радіоімпульсу  $\phi_0$  є випадковою величиною, то КФ радіоімпульсу визначається формулою (4.14). Обвідна КФ радіоімпульсу збігається з КФ сигналу, який є обвідною радіоімпульсу. На рис. 4.4, *б* наведено КФ радіоімпульсу, побудовану за формулою (4.14) при  $f_0 = 4/T_i$ .

Перетворення Фур'є від виразу (4.14) дає квадрат амплітудного спектра сигналу (4.12):

$$S^2(f) = 0,25 \left( AT_i \frac{\sin(\pi(f-f_0)T_i)}{\pi(f-f_0)T_i} \right)^2, \quad -\infty < f < \infty \quad (4.15)$$

### Практичні завдання

Завдання 1. Побудувати структурні схеми корелометрів для дослідження кореляційних функцій випадкових процесів і детермінованих сигналів.

Завдання 2. Розрахувати і побудувати графіки КФ П-імпульсу і радіоімпульсу з П-подібною обвідною за таких вихідних даних: тривалість імпульсів  $T_i = 2$  мс, частота коливання радіоімпульсу  $f_0 = 500 \cdot (N + 1)$  Гц. Для заданих імпульсів розрахувати і побудувати графіки спектрів за виразами (4.12) і (4.15).

### Контрольні питання

1. Дати визначення КФ випадкового процесу.
2. Як визначається КФ ергодичного процесу?
3. Перерахувати основні властивості КФ випадкового процесу.
4. Які параметри випадкового процесу можна визначити, за його КФ?
5. Що стверджує теорема Вінера-Хінчина?
6. Перерахувати способи визначення інтервалу кореляції.
7. Який існує зв'язок між шириною спектра і інтервалом кореляції випадкового процесу?
8. Який вигляд має КФ П-імпульсу?
9. Який вигляд має КФ радіоімпульсу з П-подібною обвідною?
10. Чому початкова фаза радіоімпульсу не впливає на його КФ?

## ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРІВ ІМПУЛЬСНИХ СИГНАЛІВ

Мета: набуття навичок розрахунку ширини спектру АІМ сигналу в каналах зв'язку.

### Теоретичні відомості

Сукупність амплітуд та відповідних їм частот гармонічних складових розкладу в ряд Фур'є називають спектром амплітуд періодичного сигналу  $x(t)$ . Сукупність фаз  $\varphi_k$  та відповідних їм частот  $\omega_k$  називають спектром фаз.

Спектр амплітуд та спектр фаз однозначно визначають періодичний сигнал  $x(t)$ . Характерною особливістю спектра періодичного сигналу  $x(t)$  є його дискретність. Одним з основних методів аналізу інформаційних сигналів є їх розклад на елементарні складові у вигляді гармонічних коливань за допомогою ряду Фур'є. Тригонометрична амплітудно-фазова форма такого ряду може бути записана у вигляді такого виразу

$$x(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \cos(k\omega_0 t - \varphi_k)), \quad (5.1)$$

де  $x(t)$  – періодичний сигнал довільного типу,  $A_0$  – амплітуда постійної складової функції,  $k$  – порядковий номер гармонічної складової розкладу,  $\omega_0$  – колова частота першої гармонічної складової,  $t$  – миттєвий час,  $\varphi_k$  – початкова фаза  $k$ -ї гармонічної складової.

Залежність амплітуди  $k$ -ї гармоніки від колової частоти називається спектром амплітуд. Спектр амплітуд дозволяє наочно проводити аналіз сигналів з точки зору їх узгодження з параметрами смуги пропускання лінійних трактів інформаційних систем. Графічно спектр амплітуд довільного періодичного сигналу може мати такий вигляд на рис.8.1. Найбільш проста процедура побудови спектрів амплітуд періодичної імпульсної послідовності, що має період  $T$ , ширину імпульсів  $\tau$  та амплітуду імпульсів  $h$ .

Для визначення величини амплітуд гармонічних складових спектра амплітуд можна використати такі вирази:

$$A_0 = h \frac{\tau}{T}, \quad A_k = \frac{2h\tau}{T} \frac{\sin(k \cdot \omega_0 \cdot \tau / 2)}{k \cdot \omega_0 \cdot \tau / 2}, \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T}. \quad (5.2)$$

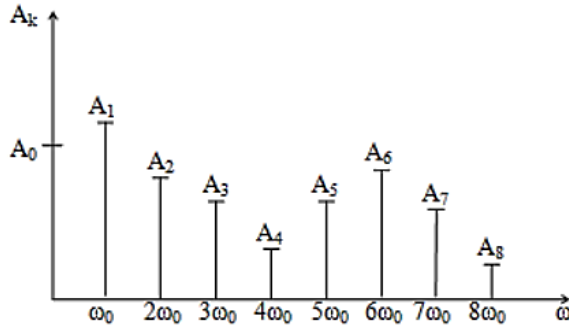


Рисунок 5.1 – Спектр амплітуд періодичного сигналу

За практичну ширину спектра сигналу  $x(t)$  приймають той діапазон частот спектра сигналу, в рамках якого знаходиться основна частина енергії сигналу.

Вибір практичної ширини спектру визначається енергетичним вмістом спектру через потужність. При цьому потужність може бути визначена з виразу:

$$P_x(t) = R \left( A_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} A_k^2 \right) \quad (5.3)$$

де  $P_x(t)$  – потужність, що виділяється сигналом на опорі навантаження  $R$ . Для визначення практичної ширини спектру потрібно знайти потужність, що виділяється на опорі  $R$  всім сигналом  $x(t)$ , а потім послідовно знаходити процентне відношення частини спектра амплітуд, що містять першу, першу та другу, першу, другу та третю і т. д. гармонічні складові:

$$\frac{A_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^1 (A_i^2)}{A_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} A_k^2} \cdot 100\%, \quad \frac{A_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 (A_i^2 + A_2^2)}{A_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} A_k^2} \cdot 100\%, \quad (5.4)$$

$$\frac{A_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k (A_i^2 + \dots + A_i^2)}{A_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} A_k^2} \cdot 100\% .$$

Значення  $A_k$ , при якому процентне співвідношення складе 95% та більше процентів, визначає верхню частоту в практичній ширині спектра сигналу  $x(t)$ .

$$f_{\text{оч}} = k_i \cdot f_0, \quad f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} \quad (5.7)$$

що визначається в герцах при  $T$  в мілісекундах.

### Практичні завдання

Завдання 1. Виберіть з таблиці варіанти індивідуальних завдань для побудови спектра амплітуд періодичного імпульсного сигналу. Варіанти завдань наведені в таблиці 5.1. Визначити величини амплітуд гармонічних складових спектра амплітуд відповідно до варіанту. Амплітуду імпульсу приймати рівною одиниці.

Розрахувати потужність, що виділяється сигналом на опорі навантаження  $R = 1$ .

Виконати обчислення верхніх частот в практичних спектрах для індивідуальних завдань.

Побудувати графічні зображення спектрів за даними обчислень. Графік спектра амплітуд будується за модулем.

Таблиця 5.1

Вихідні дані для розрахунку задачі

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\tau$	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2
$T$	8	8	8	9	9	9	10	10	10	11

### Контрольні запитання

1. Що таке спектр сигналу?
2. Які різновиди спектрів Вам відомі, чим вони відрізняються?
3. Наведіть амплітудно-фазову тригонометричну форму ряду Фур'є та поясніть його складові частини.
4. Наведіть вирази для обчислення значень амплітуди спектра для сигналу загального виду .
5. Поясніть одержані в роботі результати з використанням графічних зображень складових спектрів амплітуд та фаз.
6. Що таке ефективна ширина спектра сигналу?
7. Як визначається потужність?
8. Наведіть вирази для розрахунку енергії складових.
9. Який порядок визначення практичної ширини спектра сигналу?

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДИСКРЕТИЗАЦІЇ АНАЛОГОВИХ СИГНАЛІВ

Мета: засвоїти теоретичні знання, одержані на лекційних заняттях, у частині проведення операцій дискретизації в часі та за рівнем, операцій кодування, а також додатково закріпити знання щодо спектрів амплітуд імпульсних сигналів.

### Теоретичні відомості

Перетворення аналогового сигналу в цифровий супроводжується проведенням операцій дискретизації та кодування. Суть операції дискретизації в часі полягає у визначенні такого мінімального значення часового інтервалу  $f_{\partial}$ , за який проводиться взяття відліків миттєвих значень амплітуди сигналу  $x(t)$ . Визначення вказаного інтервалу  $\Delta t$  проводиться на базі теореми Котельникова, що встановлює відношення

$$f_{\partial} = l \cdot f_{\partial c}, \text{ або } \Delta t = \frac{1}{l \cdot f_{\partial c}} \quad (6.1)$$

де  $l > 2$  – коефіцієнт збільшення частоти дискретизації,  $f_{\partial c}$  – верхня частота в практичній ширині спектру сигналу.

Теорема Котельникова встановлює теоретичні засади визначення інтервалу (частоти) дискретизації, в той же час практичне визначення коефіцієнта  $l$  залежить від параметрів аналогових фільтрів нижніх частот, що встановлюються на вході аналого-цифрового перетворювача.

Якщо задано динамічний діапазон  $D_s \geq 20 \lg \frac{A_{\max}}{A_{\min}}$  зміни сигналу за амплітудою, то, залежно від параметрів фільтра, коефіцієнт  $l$  визначається з умови:

$$l \geq 2 \left( 1 + \frac{D_s}{D_{\phi}} \right) \quad (6.2)$$

де  $D_{\phi}$  – динамічний діапазон характеристики завад фільтра нижніх частот при октавній (зміна частоти в два рази) смузі завад.

Суть ідеї операції дискретизації за рівнем в тому, що весь діапазон зміни миттєвих значень амплітуди сигналу  $A_k$  від нуля до максимального значення  $\max A_k$  розбивається на ряд дискретних підрівнів. Дані підрівні відрізняються один від одного на величину інтервалу дискретизації  $q$ .

Величина інтервалу дискретизації  $q$ , в свою чергу, визначається вибраною шкалою дискретизації, яка залежить від кількості двійкових символів в кодовому слові  $n$ .

Значення інтервалу дискретизації може бути визначене з умови

$$q = \frac{A_{k \max}}{2^n - 1}, \text{ де } n \geq \frac{D_3}{6}, \quad (6.3)$$

$D_3$  – задано у децибелах,  $n$  – натуральне.

Графічно операцію дискретизації за рівнем можна зобразити за допомогою рисунка 6.1.

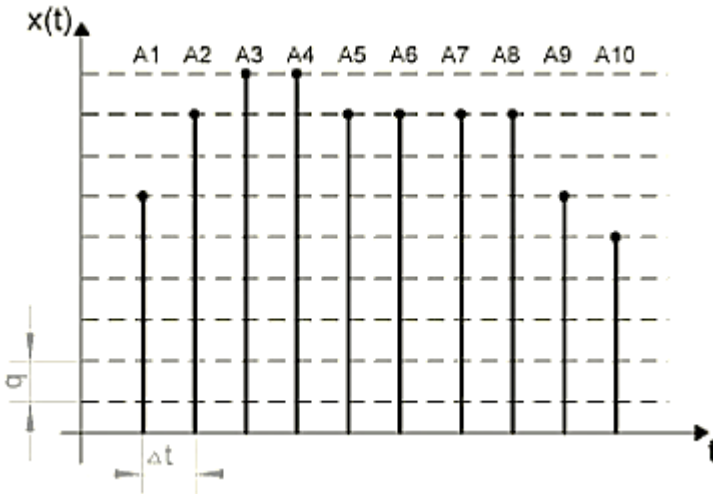


Рисунок 6.1 – Квантований сигнал

У процесі проведення операції кодування встановлюється відповідність миттєвих значень амплітуди сигналу  $x(t)$  певним кодовим словам. Ця відповідність встановлюється згідно з виразом

$$A_k = q \cdot (a_{n-1} \cdot 2^{n-1} + \dots + a_2 \cdot 2^2 + a_1 \cdot 2^1 + a_0 \cdot 2^0) \quad (6.4)$$

кодове слово

де  $A_k$  – миттєва амплітуда  $k$ -го відліку сигналу  $x(t)$ ,  $q$  – інтервал дискретизації за рівнем. Процес встановлення відповідності кодових слів миттєвим значенням амплітуди  $A_k$  за допомогою методу порозрядного врівноваження розглянути самостійно.

## Практичні завдання

Завдання 1. Розрахунок параметрів зміни сигналу  $x(t)$  інтервалу  $\Delta t$  та частоти  $f_0$  з урахуванням аналогового фільтра  $D_\phi$  та динамічного діапазону з  $D_3$ .

Виписати результати, отримані у практичній роботі № 5, (значення  $T$  в мілісекундах). Визначити інтервали  $\Delta t$  та частоти  $f_0$ . Дані параметрів фільтра та динамічного діапазону взяти з табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Вихідні дані для розрахунку задачі

Варіант	$D_3$	$D_\phi$	$U_{em,1}, B$	$U_{em,2}, B$	$U_{em,3}, B$
1	50	35	6	7	3
	75	80	3	2	4
	70	75	6	3	2
2	60	50	2	4	6
	80	95	5	2	4
	50	100	1	3	8
3	50	75	7	6	3
	75	80	5	7	9
	70	85	9	3	3
4	60	90	4	7	6
	80	95	6	2	4
	60	100	2	3	5
5	50	75	3	7	6
	75	80	8	9	3
	70	85	6	4	8
6	60	90	5	8	4
	80	95	4	9	8
	50	100	2	3	4
7	25	40	5	8	3
	30	20	5	9	7
	35	40	3	2	4
8	40	50	5	3	8
	45	50	5	6	3
	50	40	5	7	9
9	25	35	5	3	2
	30	20	5	7	6
	35	40	7	2	4
10	40	50	8	3	5
	45	50	9	7	6
	50	40	5	9	3

Завдання 2. Провести кодування за допомогою методу порозрядного врівноваження. 1. Визначити параметри розрядності  $n$  та інтервал дискретизації за рівнем  $q$  процесу квантування. Для розрахунку  $q$  рекомендується використати значення  $A_{max}=10B$ .

2. Для кожного  $U_{em,k}$ , з табл. 6.1:

1) розрахувати значення  $U_n$  для кожного такту  $n$  за формулою  $U_n = \frac{A_{max}}{2^n}$

2) здійснити кодування за допомогою методу порозрядного врівноваження;

3) здійснити перевірку отриманих кодових комбінацій за допомогою таких формул:

$$A_k = q \cdot (a_{n-1} \cdot 2^{n-1} + \dots + a_2 \cdot 2^2 + a_1 \cdot 2^1 + a_0 \cdot 2^0)$$

$$|A_k - U_{em,k}| \leq \frac{q}{2}$$

### Контрольні запитання

1. Сформулюйте теорему Котельникова.
2. Як визначається інтервал дискретизації з урахуванням характеристик фільтрів?
3. Поясніть процес дискретизації за рівнем.
4. В чому суть операції кодування?
5. Як встановлюється відповідність миттєвого значення амплітуди кодового слова?
6. Що таке завади накладання спектрів?
7. Розкажіть про основні методи перетворення інформації.

## РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОСТІ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ

Мета: оволодіти методикою розрахунку параметрів ефективності цифрової системи передачі.

### Теоретичні відомості

Під час розрахунків коефіцієнтів ефективності під каналом зв'язку розуміють сукупність засобів, що забезпечують передачу сигналів від виходу модулятора до входу демодулятора. Ефективність системи зв'язку оцінюють коефіцієнтами інформаційної, частотної та енергетичної ефективності.

Узагальненою характеристикою ефективності систем зв'язку є коефіцієнт використання каналу по пропускній спроможності (*інформаційна ефективність*), який характеризує реальну швидкість передачі інформації  $R$  по відношенню до пропускної здатності каналу зв'язку  $C$ :

$$\eta = R / C \quad (7.1)$$

Під час розрахунків ефективності швидкість передачі інформації в каналі  $R$  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.

Інформаційна ефективність  $\eta$  завжди менше одиниці; що ближче  $\eta$  до одиниці, то досконаліша система.

Коефіцієнт використання каналу за потужністю  $\beta$  або *енергетична ефективність*:

$$\beta = R / \rho_0 \quad (7.2)$$

де  $R$  – швидкість передачі інформації;  $\rho_0$  – відношення потужності сигналу  $P_C$  до спектральної густини  $N_0$  потужності шуму,  $\rho_0 = P_C / N_0$ .

Для визначення відношення  $P_C / N_0$  на виході каналу зв'язку слід користуватися формулами:

$$h_o^2 = \frac{E_b}{N_0} = \frac{P_C}{N_0} T_b, \quad \rho_{ex} = \frac{P_C}{P_n} = \frac{P_C}{N_0} \cdot \frac{1}{F_k} \quad (7.3)$$

де  $h_o^2$  і  $\rho_{ex}$  – відношення сигнал/шум на виході каналу зв'язку, за якого забезпечується задана якість відновлення повідомлення:  $h_o^2$  – для сигналів дискретної модуляції, відповідно,  $\rho_{ex}$  – для сигналів аналогової модуляції;  $E_b$  – енергія, що витрачається на передачу одного біта інформації;  $T_b$  – час

передачі джерелом одного біта інформації;  $F_k$  смуга пропускання каналу зв'язку.

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: для АМ-М, ФМ-М, ВФМ-М і КАМ-М:

$$F_s = 1/(T_C \log_2 M), \quad (7.4)$$

а для ЧМ-М:

$$F_s = M/(T_C \log_2 M), \quad (7.5)$$

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  $T_b$  на виході АЦП або кодера простого коду. Якщо ж використовується завадостійке кодування, то

$T_C = T_b \cdot \frac{k}{n}$ , де  $n$  і  $k$  – параметри коректуючого коду.

Під час передачі сигналів аналогової модуляції ширина спектру сигналу для АМ (амплітудна модуляція), БМ (балансна модуляція) і ОМ (односмугова модуляція):

$$F_s = 2 F_{max}. \quad (7.6)$$

Ширина спектру сигналу ЧМ (частотна модуляція) визначається формулою.

$$F_s = 2 F_{max} (m_{ЧМ} + 1) \quad (7.7)$$

Коефіцієнт використання каналу по смузі частот  $\gamma$  (*частотна ефективність*), визначає швидкість передачі в одиничній смузі частот:

$$\gamma = R / F_s \quad (7.8)$$

де  $F_s$  – ширина смуги частот, яку займає сигнал.

Граничні можливості системи передачі інформації можна оцінити за допомогою виразу для пропускнуєї спроможності гаусівського неперервного каналу зв'язку зі смугою частот  $F$  за формулою Шеннона:

$$C = F \log_2(1 + P/P_u) \quad (7.9)$$

Тут  $P_c = E_b * R$  – середня потужність сигналу;  $E_b$  – енергія, що витрачається на передачу одного біта інформації;  $R = 1/T_b$  – швидкість передачі джерела;  $T_b$  – час передачі джерелом одного біта інформації;  $P_u = N_0 * F$  – середня потужність шуму в смузі частот.

У реальних ТКС швидкість передачі інформації  $R$  [Біт/с], менша за пропускну здатність безперервного каналу:  $R \leq C$ . Можна показати, що після елементарних перетворень формула Шеннона зводиться до виду:

$$\beta \leq \gamma / (2\gamma - 1), \text{ де } \beta = 1/hz^2 = N_0/E_b. \quad (7.10)$$

Тоді інформаційну ефективність для гаусівського неперервного каналу можна знайти за формулою:

$$\eta = \gamma / \log_2(\gamma / (\beta + 1)). \quad (7.11)$$

Відповідно до теореми Шеннона, при відповідних способах передачі та прийому величина  $\eta$  може бути як завгодно близькою до одиниці. При  $\eta = 1$  отримуємо граничну залежність між  $\beta$  та  $\gamma$ :

$$\beta = \gamma / (2\gamma - 1). \quad (7.12)$$

Наочно дана залежність представляється у вигляді кривої  $\beta = f(\gamma)$  на площині для різних видів модуляції (рис. 7.1).

Ця залежність часто називається границею (межею) Шеннона: вона відображає найкращий обмін між  $\beta$  і  $\gamma$  в неперервному каналі.

Аналіз границі Шеннона показує, що підвищення частотної ефективності (тобто зниження витрат смуги  $1/\gamma$ ) потребує збільшення енергетичних витрат (зниження енергетичної ефективності). Для неперервного каналу частотна ефективність змінюється в межах від 0 до  $\infty$ , тоді як енергетична ефективність обмежена зверху:

$$\beta_{\max} = \lim_{\gamma \rightarrow 0} \beta = \lim_{\gamma \rightarrow 0} \frac{\gamma}{2\gamma - 1} = \frac{1}{\ln 2} \approx 1,443 \quad (7.13)$$

Аналогічні граничні залежності  $\beta = f(\gamma)$  можна отримати і для інших моделей каналу, якщо замість швидкості  $R$  підставити вираз для пропускну здатності відповідного каналу. Граничні залежності  $\beta\gamma$ -номограми дозволяють визначити системи, що задовольняють заданим вимогам щодо енергетичної та частотної ефективності, та встановити, наскільки ці показники близькі до граничних.

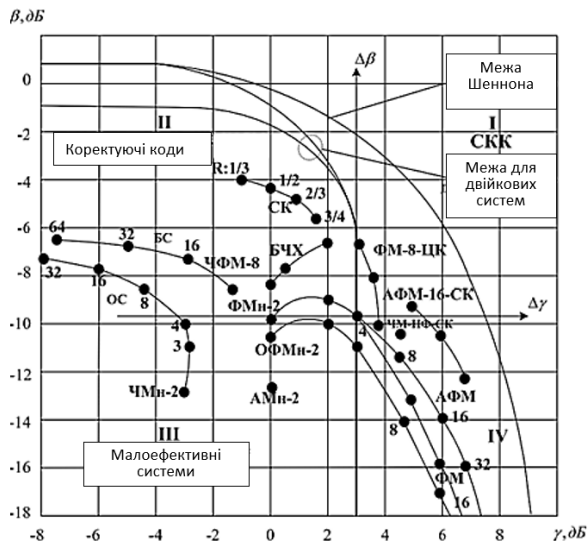


Рисунок 7.1 –Зв'язок частотної ( $\gamma$ ) та енергетичної ( $\beta$ ) ефективності

### Практичні завдання

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  $T_b$  – тривалість двійкового символу, число позицій сигналу  $M$ , швидкість коду  $k/n$ ; якщо модуляція аналогова, то  $F_{max}$  – максимальна частота спектру первинного сигналу та  $m_{ЧМ}$  – індекс модуляції (для ЧМ);

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

- продуктивність джерела повідомлень  $R_0$ .

Завдання 1. Розрахувати пропускну здатність каналу зв'язку  $C$  для заданих варіантів передачі та зіставити її значення з продуктивністю джерела повідомлень  $R_0$ .

Вихідні дані до завдання

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
модуляція	АМ -М	ФМ -М	ЧМ -М	ВФМ -М	КАМ -М	АМ	БМ	ОМ	ЧМ	АМ -М
$T_b$ , мкс	8,3	3,3	6,2	7,3	12,5	8,3	3,3	6,2	7,3	12,5
$M$	6	12	24	36	48	64	82	100	112	128
$k/n$	8/12	8/10	6/1 4	6/12	6/10	8/1 2	8/1 0	6/1 4	6/1 2	8/14
$F_{\max}$ , кГц	12	2,4	6,5	8,0	12	14	2,5	2,7	4,5	7,0
$R_d$ , кбіт/с	63,4	55	78	96	130	34	50	65	77	81
$h_o^2$	106	112	86	75	99	155	128	69	98	122
$\rho_{вх.н}$	130	56	68	74	82	99	115	120	132	130

Завдання 2. Розрахувати коефіцієнти інформаційної  $\eta$ , частотної  $\gamma$  та енергетичної  $\beta$  ефективностей для заданих варіантів передачі; побудувати графік межі Шеннона  $\beta = f(\gamma)$ . Порівняти ефективність розглянутих варіантів передачі між собою та з граничною ефективністю.

Під час побудови графіка граничної залежності  $\beta = f(\gamma)$  (межі Шеннона значення  $\beta$  і  $\gamma$  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  $\beta$  і  $\gamma$ . Якщо значення коефіцієнтів  $\beta$  і  $\gamma$  малі ( $\beta < -10$  дБ і  $\gamma < 3$  дБ), то необхідно вказати способи підвищення енергетичної та частотної ефективностей.

Результати розрахунків подати в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2.

Параметри порівнюваних систем передачі

Система передачі	Параметри						
	$R_d$ , кбіт/с	$F_k$ , кГц	$P_s/N_0$ , Гц	$C$ , кбіт/с	$\eta$	$\beta$	$\gamma$
ЦСП без завадостійкого кодування							
ЦСП з завадостійким кодуванням							
Аналогова							

### Контрольні запитання

1. За допомогою яких параметрів оцінюють ефективність системи зв'язку?
2. Запишіть формулу та поясніть зміст коефіцієнту інформаційної ефективності.
3. Запишіть формулу та поясніть зміст коефіцієнту частотної ефективності.
4. Запишіть формулу та поясніть зміст коефіцієнту енергетичної ефективності.
5. Як визначити відношення сигнал/шум на виході каналу зв'язку?
6. Що таке межа Найквіста?
7. Що визначає межа Шеннона?
8. Як оцінити граничні можливості системи передачі інформації?

## ЛІТЕРАТУРА

1. Вакуленко О. В., Голь В. Д., Ірха М. С., Хахлюк О. А. Лінії передачі: підручник. Київ : ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 218 с.
2. Головін Ю. О. Основи радіозв'язку: підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Політехніка, 2021. 234 с.
3. Головін Ю. О., Могилевич Д. І. Основи теорії радіозв'язку. Теоретичні основи та практичні аспекти. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 248 с.
4. Голь В. Д., Ірха М. С. Системи передачі даних: конспект лекцій. Київ: ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 126с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45443> (дата звернення 26.12.2023 р).
5. Гусев О. Ю., Конахович Г. Ф., Корнієнко В. І. Теорія електричного зв'язку. Львів: «Магнолія», 2021. 364 с.
6. Івашко А. В., Крилова В. А. Теорія інформації та кодування в прикладах і задачах: навч.-метод. посіб. Харків: НТУ «ХПІ», 2022. 317 с.
7. Пархомей І., Цюпа Н. Основи теорії інформаційних процесів. Частина 2. Системи обробки сигналів. навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/39133> (дата звернення 26.012.2023 р)
8. Alencar M. S., da Rocha V. C. Jr. Communication Systems. Springer Cham, 2020. 401 p.
9. Bhooshan S. Fundamentals of Analogue and Digital Communication Systems. Springer Singapore. 2022. 645 p.
10. Harris J. F. Multirate Signal Processing For Communication Systems. Prentice Hall, 2021. 600p.
11. Plonus M. Electronics and Communications for Scientists and Engineers. Elsevier Inc. 2020. 498p.



Т - 33

Теорія електричного зв'язку. Методичні вказівки до практичних занять для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Комп'ютеризовані телекомунікаційні мережі» галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації, спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка всіх форм навчання / уклад. Н.М. Якимчук, М.М. Євсюк. Луцьк: ЛНТУ, 2024. 42 с.

Комп'ютерний набір  
Редактор

Наталія ЯКИМЧУК  
Микола ЄВСЮК

Підп. до друку «\_\_»\_\_\_\_\_2024 р.

Формат 60x84/16. Папір офс.

Гарн. Таймс. Ум. друк. арк. 4.

Тираж 50 прим.

Відділ іміджу та промоції  
Луцького національного технічного університету  
43018 м. Луцьк, вул. Львівська, 75  
Друк – ВІП Луцького НТУ

