МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ БУДІВНИЦТВА, ТРАНСПОРТУ ТА ЕНЕРГЕТИКИ
КАФЕДРА АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до виконання практичних робіт з навчальної дисципліни

«ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ»

для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
спеціальності G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка»
освітньої програми «Інтернет речей та електронні комунікації»
денної та заочної форм навчання

ЗАТВЕРДЖЕНО
на засіданні кафедри автоматизації виробничих процесів
Протокол № ___ від «___» _____ 2026 року

Кропивницький – 2026

ВІДОМОСТІ ПРО ВИДАННЯ

Теорія електричного зв’язку : методичні рекомендації до виконання практичних робіт для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання спеціальності G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка», освітньої програми «Інтернет речей та електронні комунікації» / Центральноукраїнський національний технічний університет ; уклад. О. М. Дрєєв, Ю. М. Пархоменко, М.О. Федотова, Р.В. Телюта – Кропивницький : ЦНТУ, 2026.

Розробники:

Дрєєв О.М., кандидат технічних наук, доцент кафедри КбПЗ;

Пархоменко Ю. М., кандидат технічних наук, доцент кафедри АВП;

Федотова М.О., кандидат технічних наук, асистент кафедри АВП;

Телюта Р.В., кандидат технічних наук, доцент кафедри ЕТС та ЕМ.

© Центральноукраїнський національний технічний університет, 2026

ЗМІСТ

ВСТУП

ОРГАНІЗАЦІЯ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

Практична робота № 1. Математичні моделі часового представлення неперервних випадкових сигналів

Практична робота № 2. Спектральна і автокореляційна характеристики неперервних випадкових сигналів

Практична робота № 3. Дискретизація та відновлення неперервних сигналів

Практична робота № 4. Перенесення інформаційного сигналу в частотний діапазон, призначений для його передавання

Практична робота № 5. Формування сигналів з використанням властивостей нелінійних кіл. Амплітудна модуляція гармонічного несучого сигналу

Практична робота № 6. Апроксимація амплітудних характеристик нелінійних каналів зв'язку

Практична робота № 7. Проходження випадкових сигналів через канали зв'язку з нелінійною амплітудною характеристикою

Практична робота № 8. Розрахунок інформаційних параметрів джерел дискретних повідомлень

Практична робота № 9. Розрахунок статистичних параметрів дискретних каналів зв'язку

Практична робота № 10. Розрахунок пропускної здатності дискретних каналів зв'язку

Практична робота № 11. Проектування завадостійкого циклічного коду та перевірка його властивостей

Практична робота № 12. Розрахунок завадостійкості систем з різними видами модуляції у разі кореляційного приймання цифрових радіосигналів

Практична робота № 13. Проектування оптимального узгодженого фільтра для сигналу відомої форми

Практична робота № 14. Синтез неперервних детермінованих періодичних сигналів у базисі функцій Уолша

ПОРЯДОК ОЦІНЮВАННЯ ТА ВИМОГИ ДО ЗВІТІВ

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

ІНФОРМАЦІЙНІ РЕСУРСИ

ВСТУП

Навчальна дисципліна «Теорія електричного зв’язку» спрямована на формування системних знань про принципи передавання інформації, математичні моделі сигналів і завад, інформаційні характеристики джерел та каналів, методи модуляції, кодування й оптимального приймання сигналів.

Практичні заняття забезпечують закріплення теоретичних положень і набуття навичок розрахунку часових, спектральних та статистичних характеристик сигналів, дослідження дискретизації, формування модульованих сигналів, аналізу нелінійних каналів, визначення інформаційних параметрів джерел і каналів, проектування завадостійких кодів та оптимальних приймальних пристроїв.

Методичні рекомендації складаються з 14 практичних занять. Формулювання завдань, вихідні дані, варіанти та графічні матеріали практичних занять збережено за наданими методичними матеріалами.

ОРГАНІЗАЦІЯ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

Перед виконанням практичного заняття здобувач освіти повинен опрацювати відповідний теоретичний матеріал, ознайомитися з постановкою задачі, визначити номер свого варіанта та підготувати необхідні засоби для розрахунків і побудови графіків.

Під час виконання роботи необхідно дотримуватися послідовності, наведеної у вихідних матеріалах; записувати використані формули, пояснювати позначення та одиниці вимірювання, наводити проміжні результати, графіки й таблиці. Розрахунки можуть виконуватися вручну або з використанням табличних процесорів, математичних пакетів чи мов програмування, якщо це не суперечить умовам конкретного завдання.

Після виконання роботи здобувач оформлює звіт і захищає його, відповідаючи на контрольні запитання та пояснюючи отримані результати.

Практичне заняття 1

Математичні моделі часового представлення неперервних випадкових сигналів

Мета заняття: Дослідити математичні моделі часового представлення неперервних випадкових сигналів.

Постановка задачі

1.1. 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 –π до +π:

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

де U_m і ω – амплітуда і частота, які мають постійне значення; φ – початкова фаза. Значення параметрів U_m і ω згідно з варіантом задає таблиця 1.

1.2. Визначить середнє значення, середню потужність і середню потужність відхилення відносно середнього значення випадкового сигналу заданого в п. 1.1.

1.3. Необхідно розрахувати і побудувати характеристики ймовірнісної математичної моделі часового представлення флуктуаційної завади $\xi(t)$. Для флуктуаційної завади є справедливим нормальний закон розподілу і є відомі параметри: середнє значення m та ефективна напруга σ, значення яких згідно з варіантом задає табл.1.

1.4. Для випадкового сигналу, заданого в п. 1.3, користуючись характеристиками ймовірнісної математичної моделі, необхідно визначити:

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

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

в) ймовірність того, що випадковий сигнал перебуває в заданих межах $U_1 < \xi < U_2$;

г) ймовірність того, що випадковий сигнал перебуває поза межами інтервалу напруг від U_1 до U_2.

Значення величин $U_{пор}$, U_1 і U_2 наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Параметри досліджуваних випадкових сигналів і та значення величин U_m, U_1, U_2 , для завдань п. 1.1-1.4

Варіант	U_m, В	$f, кГц$	m, В	σ, B	$U_{пор}$, В	U_1, В	U_2, 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
10	1,4	2,8	+1,4	0,7	+2,0	–0,7	0
11	2,1	2,0	–0,1	0,2	+0,1	–0,3	+0,1
12	2,8	4,2	–0,8	1,6	+2,4	–4,0	+2,4
13	2,0	5,0	0	1,0	+2,0	–3,0	+3,0
14	1,1	1,8	+1,1	0,55	–0,3	0	+2,2
15	2,5	1,4	+0,5	1,0	+0,5	–2,5	–3,0

Рекомендації до формування методики розв’язування задачі

1. Функція для щільності (густини) розподілу ймовірностей появи значень неперервного випадкового сигналу $s(t)$ типу гармонічний сигнал, у якого початкова фаза, рівномірно розподілена випадкова величина, є відомою і з методикою її одержання можна ознайомитись в [3] або [4].

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

2. Другу характеристику закону розподілу сигналу $s(t)$, саме функцію розподілу, знаходимо за визначенням

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

3. Знаходимо параметри неперервного випадкового сигналу $s(t)$, для чого потрібно застосувати відомі з теорії ймовірностей формули:

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

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

$$P_{сер.відх.} = D[s] = \overline{s^2(t)} - \bar{s}^2(t)$$

4. Для неперервного випадкового сигналу $\xi(t)$ формулу для щільності (густини) розподілу ймовірностей появи його значень вибираємо на підставі умови про те, що він є нормальним; отже, необхідно використати функцію Гаусса:

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

де $\bar{\xi}$ – середнє значення неперервного випадкового сигналу $\xi(t)$;
σ^2 – дисперсія неперервного випадкового сигналу $\xi(t)$;

5. Спосіб знаходження функції розподілу для випадкового сигналу $\xi(t)$ Ви знайдете в посібнику [3] на с. 117.

Контрольні запитання для формування висновків до роботи

1. Як визначається ймовірність того, що випадковий сигнал перебуває в заданих межах від U_1 до U_2, якщо є відомою:

а) функція розподілу? б) густина розподілу ймовірностей?

2. Як визначається ймовірність того, що випадковий сигнал не перевищує заданий пороговий рівень, якщо є відомою:

а) функція розподілу? б) густина розподілу ймовірностей?

3. Як визначається ймовірність того, що випадковий сигнал перевищує заданий пороговий рівень, якщо є відомою:

а) функція розподілу? б) густина розподілу ймовірностей?

4. Чому під час визначення середнього значення і середньої потужності для гармонічного коливання з випадковим рівномірно розподіленим значенням початкової фази шляхом усереднення однієї реалізації в часі Ви обмежували границі інтегрування?

Практичне заняття 2

Спектральна і автокореляційна характеристики неперервних випадкових сигналів

Мета заняття: Дослідити спектральні і автокореляційні характеристики неперервних випадкових сигналів

Постановка задачі

Експериментально були зняті спектральні характеристики для 8-ми стаціонарних неперервних випадкових сигналів. Ці характеристики апроксимовані відповідними математичними функціями $G(\omega)$, які наведені в табл.2.1.

Таблиця 2.1 – Математичні моделі частотного представлення заданих сигналів

Варіанти	Функції $G(\omega)$,якими апроксимовані спектральні характеристики неперервних випадкових сигналів	α
1 і 9	$\frac{\alpha^2 \cdot G_0}{\alpha^2+\omega^2}$, де G_0= 1Вт/Гц	10^3
2 і 10	$\frac{\alpha^2 \cdot G_0}{\alpha^2+(\omega_0-\omega)^2}$, де $\omega_0 = 10^3\alpha$; G_0= 1Вт/Гц	$5 \cdot 10^5$
3 і 11	$G_0 \cdot exp\left(-\frac{\omega^2}{\alpha^2}\right)$, де G_0= 1Вт/Гц	10^2
4 і 12	$G_0 \cdot exp\left(-\frac{(\omega-\omega_0)^2}{\alpha^2}\right)$, де $\omega_0 = 10^3\alpha$; G_0= 1Вт/Гц	10^2
5 і 13	$G(\omega) = \begin{cases} G_0, & 0 \le \omega \le \alpha \\ 0, & \omega > \alpha \end{cases}$, де G_0= 1Вт/Гц	10^2
6 і 14	$G(\omega) = \begin{cases} G_0, & \lvert\omega-\omega_0\rvert \le \alpha \\ 0, & \lvert\omega-\omega_0\rvert > \alpha \end{cases}$, де $\omega_0 = 10^3\alpha$; G_0= 1Вт/Гц	10^6
7 і 15	$G(\omega) = \begin{cases} G_0 \cdot \frac{\omega}{\alpha}, & 0 \le \omega \le \alpha \\ 0, & \omega > \alpha \end{cases}$, де G_0= 1Вт/Гц	$5 \cdot 10^4$
8 і 16	$G(\omega) = \begin{cases} G_0 \cdot \frac{\omega-\omega_0}{\alpha}, & \omega_0 \le \omega \le \omega_0+\alpha \\ 0, & \omega < \omega_0 \end{cases}$, де $\omega_0 = 10^3\alpha$; G_0= 1Вт/Гц	$5 \cdot 10^2$

1. Необхідно розрахувати і подати у вигляді графіка задану у Вашому

варіанті (див. табл.2) спектральну характеристику неперервного випадкового сигналу.

2. Використовуючи спектральну характеристику заданого сигналу, визначить ширину його спектра та середнє значення потужності.

3. Необхідно розрахувати і подати у вигляді графіка автокореляційну характеристику $B(\tau)$ заданого сигналу.

4. Використовуючи автокореляційну характеристику заданого сигналу, визначить його інтервал кореляції та середнє значення потужності.

Рекомендації до формування методики розв'язування задачі

1. Для визначення ширини спектра сигналу, у разі, коли спектральна характеристика не є обмеженою, потрібно застосувати формулу

$$\Delta f_{\text{еф}} = \frac{\int_0^{\infty} G(\omega) \cdot d\omega}{G_{\text{макс}}}$$

де $G_{\text{макс}}$ – максимальне значення спектральної характеристики.

2. Для розрахунку автокореляційної характеристики заданого випадкового сигналу потрібно застосувати формулу (2.43а) з підручника [Теория передачи сигналов / А.Г. Зюко, Д.Д. Кловский, М.В. Назаров, Л.М. Финк. – М.: Радио и связь, 1986], яку Ви знайдете на с. 40.

$$B(\tau) = 2\int_0^{\infty} G(f)\, cos(2\pi f\tau) df$$

Цю формулу потрібно застосувати у варіантах з низькочастотними сигналами ($\omega_0 = 0$). Для високочастотних сигналів ($\omega_0 \gg \alpha$) автокореляційна характеристика визначається за огинаючою і має вигляд

$$B(\tau) = B_0(\tau) cos(2\pi f\tau),$$

де $B_0(\tau)$ – огинаюча автокореляційної характеристики

$$B_0(\tau) = 2\int_0^{\infty} G_{\text{н.ч.}}(f)\, cos(2\pi f\tau) df$$

де $G_{\text{н.ч.}}(f) = G(f - f_0)$.

Для переходу від до необхідно різницю частот $2\pi(f - f_0)$ у виразі для $G(f)$ замінити на частоту $\omega = 2\pi f$, тобто якщо

$G(f) = G_0 cos[2\pi(f - f_0)\tau]$, то $G_{\text{н.ч.}}(f) = G_0 cos(2\pi f)$.

3. Для визначення інтервалу кореляції потрібно застосувати формулу

$$\tau_{\text{к}} = \frac{\int_0^{\infty} B_0(\tau)d\tau}{B_0(0)}$$

де B_0 – огинаюча автокореляційної характеристики сигналу.

Величину $\tau_{\text{к}}$ можна визначити з графіка автокореляційної характеристики (АКХ), як часовий інтервал, коли кореляція між сусідніми значеннями сигналу вже відсутня. Тобто, коли існує точка $B(\tau) = 0$.

Контрольні запитання для формування висновків до роботи

1. Як ви обґрунтували вибір меж інтегрування під час визначення АКХ заданого сигналу?
2. Які параметри сигналу можна визначити з АКХ випадкового сигналу?
3. Як можна визначити АКХ випадкового сигналу, якщо Ви експериментально виміряли його спектральну густину потужності?
4. Чи існує залежність між параметрами неперервного випадкового сигналу «ширина спектра» та «інтервал кореляції»? Якщо є, то якою є ця залежність?

Практичне заняття 3

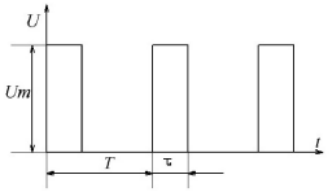
Дискретизація та відновлення неперервних сигналів

Мета заняття: дослідити спектр сигналу. Перевірити на практиці справедливість теореми про дискретизацію.

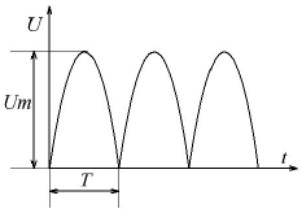
Постановка задачі

1. Необхідно визначити величину інтервалу рівномірної дискретизації $T_д$ для заданого сигналу (див. рис.3.1).

1)



2)



3)

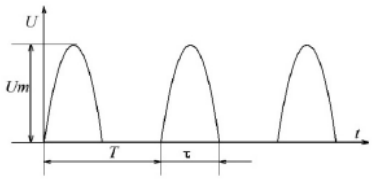


Рис.3.1 – Форма вхідних сигналів

Вхідні дані згідно з варіантом необхідно вибрати з табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри вхідних сигналів

Варіант	Форма сигналу	U_m, В	τ, мксек	T, мксек	F, кГц
1	1	1	130	600	
2	2	2			10
3	3	3			28

4	1	4	150	650	
5	2	5			35
6	3	6			45
7	1	7	140	550	
8	2	8			50
9	3	9			65
10	1	10	160	300	
11	2	11			70
12	3	12			85
13	1	13	180	420	
14	2	14			90
15	3	15			100
16	1	16	190	310	
17	2	17			110
18	3	18			220
19	1	19	200	520	
20	2	20			380

Примітка: Для сигналів 2 і 3 в таблиці задані параметри гармонічною сигналу, з якого ці сигнали сформовані.

1.1. Побудувати часову математичну модель для заданого сигналу $s(t)$.

1.2. Визначити середнє значення потужності сигналу

1.3. Сформувати умову для визначення ефективної ширини спектра заданого сигналу в такому вигляді.

1.4. Знайти значення амплітуд та потужності складових спектра сигналу.

1.5. Перевірити виконання умови, сформульованої у (2.4), і визначити верхню частоту спектра сигналу $f_в$.

6. Визначити інтервал дискретизації:

$$T_д = \frac{1}{2 \cdot f_в}$$

7. Здійснити перевірку достовірності отриманого результату.

Рекомендації до формування методики розв'язування задачі

1. Побувати часову математичну модель для заданого сигналу $s(t)$.

2. Сформувати умову для визначення ефективної ширини спектра заданого сигналу в такому вигляді:

$$0.9 \cdot P_c \leq P_0 + P_1 + P_2 + .. + P_n,$$

де – потужність складових спектра сигналу ; – номер гармоніки, за якої умова виконується.

3. Визначити середнє значення потужності сигналу:

$$P_c = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s^2(t)dt$$

4. Знайти значення амплітуд та потужності складових спектра сигналу.

$$U_0 = \frac{a_0}{2}$$

$$U_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t)dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) \cdot cos(\omega_1 nt)dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) \cdot sin(\omega_1 nt)dt$$

$$P_0 = U_0^2$$

$$P_n = \left(\frac{U_n}{\sqrt{2}}\right)^2 = \frac{U_n^2}{2}; n = 1,2, \dots$$

5. Перевірити виконання умови, сформульованої у пункті 2, і визначити верхню частоту спектра сигналу $F_в$.

6. Визначити інтервал дискретизації.

$$\Delta t = \frac{1}{2 \cdot F_в}$$

7. Здійснити перевірку достовірності отриманого результату.

Контрольні запитання для формування висновків до роботи

1. Який зміст вкладено в поняття «ширина спектра сигналу»?
2. Які характерні особливості спектральних характеристик детермінованих періодичних сигналів?
3. Яка різниця між поняттями «ширина спектра сигналу» і «ефективна ширина спектра сигналу»?
4. Чому потужність постійної складової сигналу визначається $P_0 = U_0^2$, а потужність гармонік $P_n = \frac{U_n^2}{2}$?
5. Як Ви визначали частоту першої гармоніки в спектрі заданого сигналу?
6. Яким способом Ви здійснили перевірку достовірності одержаного результату?

Практичне заняття 4

Перенесення інформаційного сигналу в частотний діапазон, призначений для його передавання

Мета заняття: дослідити ефективну ширину спектра сигналу при різних параметрах сигналу.

Постановка задачі

1. Через канал зв'язку треба передати **цифровий сигнал з** тривалістю $\tau_{ц.с} = 8$ мсек, який представляє кодову комбінацію 10111011.

Оцініть:

1) ефективну ширину спектра цього цифрового сигналу;

2) як поміняється значення ефективної ширини спектра цього цифрового сигналу у разі збільшення його тривалості в два рази.

Вхідні дані індивідуальних завдань наведені в табл.4.

2. Через канал зв'язку треба передати цифровий радіосигнал з **відносно-фазовою маніпуляцією** (ВФМ$_{Н}$) з такими параметрами: частота сигналу переносника $f_n = 2{,}7$ МГц, тривалість радіосигналу $\tau_{ц.с} = 8$ мсек, радіосигнал представляє кодову комбінацію 10111011.

Оцініть:

1) ефективну ширину спектра цього цифрового радіосигналу;

2) як поміняється значення ефективної ширини спектра цього цифрового радіосигналу у разі збільшення його тривалості в два рази.

Вхідні дані індивідуальних завдань наведені в табл.4.

3. Через канал зв'язку треба передати цифровий радіосигнал з **амплітудною маніпуляцією** (АМ$_{Н}$) з такими параметрами: частота сигналу переносника $f_n = 2{,}7$ МГц, тривалість радіосигналу $\tau_{ц.с} = 8$ мсек, радіосигнал представляє кодову комбінацію 10111011.

Оцініть:

1) ефективну ширину спектра цього цифрового радіосигналу;

2) як поміняється значення ефективної ширини спектра цього цифрового радіосигналу у разі збільшення його тривалості в два рази.

Вхідні дані індивідуальних завдань наведені в табл.4.

4. Через канал зв'язку треба передати цифровий радіосигнал з **частотною маніпуляцією** (ЧМ$_{Н}$), який має такі параметри: частота сигналу переносника $f_{n1} = 50$ МГц і, $f_{n0} = 55$ МГц тривалість радіосигналу$\tau_{ц.с} = 16$ мсек, радіосигнал представляє кодову комбінацію 10111011.

Оцініть:

1) ефективну ширину спектра цього цифрового радіосигналу;

2) як поміняється значення ефективної ширини спектра цього цифрового

радіосигналу у разі збільшення його тривалості в два рази.

3) чи правильно вибрані частоти сигналів переносників для обох варіантів тривалостей радіосигналу.

Вхідні дані індивідуальних завдань наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Вхідні дані індивідуальних завдань

Варіант	Тривалість цифрового сигналу, мсек	Кодова комбінація	Частота сигналу переносника f_{n1},	Частота сигналу переносника f_{n2}
1	32	101110100011 1100	100 МГц	120 МГц
2	4	10010101	60 МГц	65 МГц
3	25	10110	40 МГц	44 МГц
4	36	001001110101	27 МГц	30 МГц
5	16	101110100011 1100	900 МГц	910 МГц
6	40	10010101	14 МГц	15 МГц
7	50	10110	3 МГц	3,5 МГц
8	1,2	001001110101	0,8 МГц	0,83 МГц
9	48	101110100011 1100	35 МГц	36 МГц
10	8	10010101	1,2 МГц	1,3 МГц
11	30	10110	110 МГц	107 МГц
12	48	001001110101	1800 МГц	1820 МГц
13	1,6	101110100011 1100	71 МГц	72,5 МГц
14	0,16	10010101	9 МГц	10,5 МГц
15	60	10110	900 МГц	905 МГц

Рекомендації до формування методики розв’язування задачі

Прочитайте розділ 1, а також підрозділи 2.4 і 5.3 підручника: Волочій Б.Ю. Передавання сигналів у інформаційних системах. Частина 1. –Львів: Вид-во Над. ун-ту "Львівська політехніка", 2005.

Контрольні запитання для формування висновків до роботи

1. Який зміст вкладено в поняття "ширина спектра сигналу"?
2. Які характерні особливості спектральних характеристик детермінованих періодичних сигналів?
3. Яка різниця між поняттями "ширина спектра сигналу" і "ефективна

ширина спектра сигналу"?

4. Чому потужність постійної складової сигналу визначається $P_0 = U_0^2$, а потужність гармонік $P_n = \frac{U_n^2}{2}$?

5. Як ви визначали частоту першої гармоніки в спектрі заданого сигналу?

6. Яким способом Ви здійснили перевірку достовірності одержаного результату?

Практичне заняття 5

Формування сигналів з використанням властивостей нелінійних кіл. Амплітудна модуляція гармонічного несучого сигналу

Мета заняття: дослідити методику формування сигналів нелінійними схемами..

Постановка задачі

На вході амплітудного модулятора, вольт-амперна характеристика якого апроксимована поліномом третього степеня

$$i = a_0 + a_1 u + a_2 u^2 + a_3 u^3,$$

діє напруга сформована несучим U_{ω_0} і модулюючим U_Ω сигналами

$$u = -E + U_\Omega \cos(\Omega t) + U_{\omega_0} \cos(\omega_0 t).$$

Вхідні дані можна вибрати з табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Параметри несучого і модулюючого сигналів та математичної моделі модулятора

Варіант	E, B	U_Ω, B	$a_1, \frac{мА}{B}$	$a_2, \frac{мА}{B^2}$	$a_3, \frac{мА}{B^3}$	U_{ω_0}, B
1	2,5	2,0	4,53	0,39	0,05	1,8
2	3,0	2,5	8,73	0,844	0,07	1,6
3	2,8	2,2	9,0	0,8	0,06	1,4
4	4,5	3,5	16,0	10,0	1,3	2,8
5	8,0	4,9	13,0	3,3	0,8	3,2
6	6,0	3,8	11,2	2,85	0,7	3,0
7	2,0	1,6	4,8	0,43	0,04	1,2
8	3,5	2,2	9,0	0,85	0,03	1,4
9	5,6	2,5	10,0	5,0	0,08	2,2
10	7,2	4,6	12,0	7,0	0,09	2,3
11	2,5	2,0	5,5	0,42	0,07	1,8
12	3,0	2,5	9,5	1,2	0,1	1,6
13	2,8	2,2	9,8	0,92	0,15	1,4
14	4,5	3,5	14,0	8,0	1,5	2,8
15	8,0	4,9	12,0	6,0	0,2	3,2

Вихідний контур модулятора настроєний на частоту ω_0 має смугу пропускання $\Delta\omega = 2\Omega$.

Необхідно:

1) записати в узагальненому вигляді рівняння для струму, який протікає у вихідному контурі модулятора;

2)визначити коефіцієнт глибини модуляції m та амплітуду струму I_{a1} при заданому значенні E (скласти методику та виконати розрахунки);

3) побудувати статичну модуляційну характеристику за зміни значень вхідного сигналу від 0 до E_{max} (E_{max} – значення напруги, за якої струм першої гармоніки в колі $I_{a1} = 0$).

Рекомендації до формування методик розв'язання задач

1. Рівняння струму, який протікає у вихідному колі модулятора, має такий вигляд:

$$i = a_0 + a_1 u + a_2 u^2 + a_3 u^3$$

діє напруга сформована несучим U_{ω_0} і модулюючим U_Ω сигналами

$$u = -E + U_\Omega \cos(\Omega t) + U_{\omega_0} \cos(\omega_0 t)$$

Отже,

$$\begin{aligned} i = a_0 &+ a_1(-E + U_\Omega \cos(\Omega t) + U_{\omega_0} \cos(\omega_0 t)) \\ &+ +a_2(-E + U_\Omega \cos(\Omega t) + U_{\omega_0} \cos(\omega_0 t))^2 \\ &+ a_3(-E + U_\Omega \cos(\Omega t) + +U_{\omega_0} \cos(\omega_0 t))^3 \end{aligned}$$

2. Коефіцієнт глибини модуляції m визначають так:

$$m = \frac{U_\Omega}{U_{\omega_0}}$$

де U_Ω – амплітуда інформаційного сигналу; U_{ω_0} – амплітуда сигналу переносника.

3. Статична модуляційна характеристика – це функція:

$$i_{вих} = \psi(u_{вх})$$

$$i_{вих} = a_0 + a_1 u_{вх} + a_2 u_{вх}^2 + a_3 u_{вх}^3$$

де $u_{вх} = 0 \ldots 3E_{max} = 0 \ldots 10{,}5\ B$.

Контрольні запитання для формування висновків

1. Яким способом можна перенести спектр інформаційного сигналу в потрібний частотний діапазон?

2. Від яких параметрів АМ-сигналу залежить висота (амплітуда) бокових складових спектра цього сигналу?

3. З яких міркувань доцільно перетворювати АМ-сигнал у радіосигнал з подавленою в його спектрі несучою складовою?

4. За якою ознакою радіоелектронну схему можна зарахувати до класу нелінійних кіл?

Практичне заняття 6

Апроксимація амплітудних характеристик нелінійних каналів зв'язку

Мета заняття: набути практичні навички методики апроксимація амплітудних характеристик нелінійних каналів зв'язку

Постановка задачі

Експериментально отримано амплітудну характеристику каналу зв'язку. За цією характеристикою сформувати математичну модель каналу зв'язку. Вибрати вираз для апроксимації амплітудної характеристики. Перевірити методом приведення до лінійного вигляду чи підходить вибраний вираз до заданої характеристики. Визначити середньоквадратичну похибку апроксимації. Вхідні дані згідно з варіантом необхідно вибрати з табл.6.1.

Таблиця 6.1 – Вхідні дані задачі

№ вар	$U_{вх}$	-2	-1	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2	3
0	$U_{вих}$	0	0	0	0,15	0,3	0,5	0,65	0,8	1,6	2,4
1	$U_{вих}$	0	0	0,2	0,3	0,45	0,55	0,7	0,8	1,4	2
2	$U_{вих}$	0,5	0,7	1	1,2	1,6	1,9	2,3	2,6	3,0	3,3
3	$U_{вих}$	0	0	0	0	0	0,5	0,7	0,9	1,8	2,7
4	$U_{вих}$	0	0	0	0,08	0,32	0,72	1,28	2	8	18
5	$U_{вих}$	0,3	0,5	0,7	1,1	1,3	1,7	2	2,3	2,5	3,4
6	$U_{вих}$	0	0	0	0	0,25	0,55	0,96	1,5	6	13,5
7	$U_{вих}$	0	0	0,1	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	2,5	4
8	$U_{вих}$	0,2	0,5	0,8	1,2	1,5	1,9	2,3	3	7	12
9	$U_{вих}$	0	0,01	0,03	0,06	0,12	0,24	0,9	2	5	10
10	$U_{вих}$	0	0	0	0,5	0,8	1,2	2	5	9	16
11	$U_{вих}$	0,4	0,8	1,6	3,3	6,8	12	18	22	24	25
12	$U_{вих}$	0	0,05	0,2	0,5	0,8	1	1,3	1,8	2,8	3,8
13	$U_{вих}$	0	0	0	1	2	4	6	8	12	18
14	$U_{вих}$	0,1	0,19	0,5	0,8	1,2	1,6	1,9	2,8	4,9	8
15	$U_{вих}$	0	0	0,05	0,1	0,5	1	1,5	2,4	6	9

Рекомендації до методики розв'язування задачі

Для амплітудної характеристики каналу зв'язку, що отримана експериментально, виконати наступне:

1. Графічно зобразити задану характеристику каналу зв'язку.

2. Вибрати вираз для апроксимації амплітудної характеристики. Як апроксимуючі функції можна вибрати:

2.1 поліном другого степеня

$$U_{вих} = a_0 \cdot U_{вх}^0 + a_1 \cdot U_{вх}^1 + a_2 \cdot U_{вх}^2, \quad (1)$$

2.2 поліном третього степеня

$$U_{вих} = a_0 \cdot U_{вх}^0 + a_1 \cdot U_{вх}^1 + a_2 \cdot U_{вх}^2 + a_3 \cdot U_{вх}^3, \quad (2)$$

2.3 поліном n −го степеня

$$U_{вих} = a_0 \cdot U_{вх}^0 + a_1 \cdot U_{вх}^1 + a_2 \cdot U_{вх}^2 + \cdots + a_n \cdot U_{вх}^n, \quad (3)$$

2.4 експоненційну функцію

$$U_{вих} = A \cdot e^{a \cdot U_{вх}}. \quad (4)$$

3. Визначити коефіцієнти апроксимації a_n.

4. Побудувати апроксимовану амплітудну характеристику.

5. Визначити точність апроксимації. Для цього необхідно обчислити середньоквадратичну похибку

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{10} \cdot \sum_{i=1}^{10} \left(U_i^e - U_i^a\right)^2}, \quad (5)$$

де $(U_i^e - U_i^a)$ – різниця між значеннями напруги на виході каналу зв'язку, визначеними експериментально та з апроксимуючої функції.

Контрольні запитання для формування висновків

1. Що таке апроксимація?
2. Від яких чинників залежить точність апроксимації?
3. Для чого виконують апроксимацію експериментально знятих даних?
4. Що таке амплітудна характеристика каналу зв'язку?
5. Який канал зв'язку називається нелінійним?

Практичне заняття 7

Проходження випадкових сигналів через канали зв'язку з нелінійною амплітудною характеристикою

Мета заняття: набути практичні навички визначення параметрів випадкових сигналів при проходженні через канал зв'язку з нелінійною амплітудною характеристикою

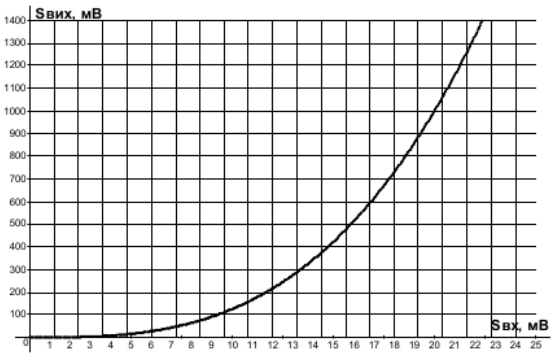
Постановка задачі

На вході каналу зв'язку з нелінійною амплітудною характеристикою діє випадковий сигнал $s(t)$ з нормальним (гауссовим) законом розподілу $p(s)$ з параметрами: середнє значення сигналу (постійна складова) U_s (мВ), значення ефективної напруги σ_s (мВ). Знайти густину розподілу ймовірностей появи значень випадкового сигналу на виході каналу зв'язку і побудувати її графік за умови, що в каналі відсутні завади. Знайти параметри U_s та σ_s вихідного сигналу.

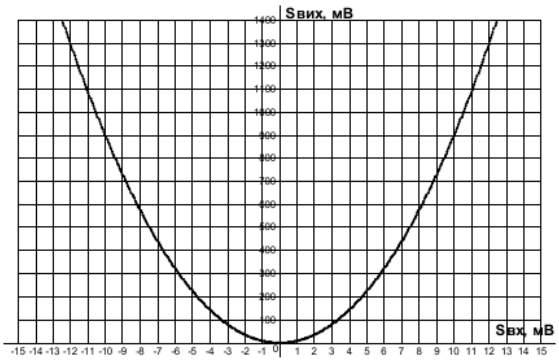
Варіанти завдань наведено в табл. 7.1.

Таблиця 7.1 – Варіанти завдань

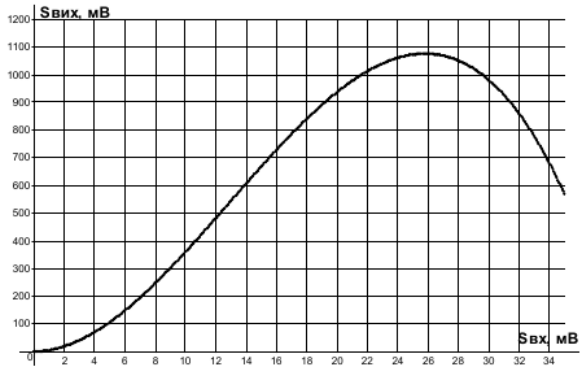
Варіант	U_s, мВ	σ_s, мВ	Амплітудна характеристика
1	6	2	Рис.2,а
2	–3	4	Рис.2,б
3	2	6	Рис.2,в
4	0	8	Рис.2,а
5	7	12	Рис.2,б
6	–4	15	Рис.2,в
7	–1	9	Рис.2,а
8	9	1	Рис.2,б
9	1	10	Рис.2,в
10	4	11	Рис.2,а
11	–8	7	Рис.2,б
12	–5	3	Рис.2,в
13	8	5	Рис.2,а
14	–6	13	Рис.2,б
15	–9	14	Рис.2,в



а)



б)



в)

Рис.7.1. – Амплітудна характеристика каналу зв’язку

Рекомендації до методики розв'язання задачі

1. Записати вираз для математичної моделі сигналу.
2. Визначити функцію, якою можна апроксимувати амплітудну

характеристику.

3. Знайти загальний вигляд густини розподілу ймовірності появи сигналу на виході каналу зв'язку

$$p(s_{вих}) = \delta(0) \cdot P_1 + \frac{p(s_{вх})}{\left|\frac{dy}{dx}\right|}$$

де $P_1 = \int_{-\infty}^{U`} P(s) \cdot ds$, $\frac{dy}{dx} = \frac{dU_{ВИХ}}{dU_{ВХ}}$

Контрольні запитання для формування висновків до роботи

1. Який канал зв'язку називається лінійним?
2. Який канал зв'язку називається нелінійним?
3. Чи забезпечується умова нормування для закону розподілу випадкового сигналу на виході нелінійного каналу зв'язку? Поясніть чому?
4. Який канал зв'язку називається безінерційним?
5. Які зміни потрібно очікувати в характеристиці «спектральна густина потужності випадкового сигналу» після його проходження через нелінійний канал зв'язку?

Практичне заняття 8

Розрахунок інформаційних параметрів джерел дискретних повідомлень

Мета заняття: набуття практичних навичок розрахунку інформаційних параметрів джерел дискретних повідомлень

Постановка задач

Задача 1. Джерело інформації формує незалежні повідомлення. Алфавіт джерела **A** складається з **m** повідомлень, тривалість яких є однакова і дорівнює – τ (мсек). Поява будь-якого повідомлення не залежить від того, які повідомлення були на виході джерела у попередні моменти часу.

Визначить ентропію джерела повідомлень $H(A)$ і його продуктивність R_∂, якщо відомі ймовірності появи окремих повідомлень – $P(A_к), k = 1,2, \dots, m$.

Вкажіть, як треба змінити параметри джерела, щоб ентропія досягла максимального значення.

Вхідні дані для розрахунків згідно з варіантом необхідно вибрати з табл.8.1.

Таблиця 8.1 – Параметри джерел повідомлень

Варіант	m	τ, мсек	$P(a_1)$	$P(a_2)$	$P(a_3)$	$P(a_4)$
1	5	1	0.2	0.1	0.2	0.3
2	4	2	0.1	0.2	0.3	-
3	3	3	0.4	0.3	-	-
4	5	4	0.5	0.1	0.1	0.1
5	4	5	0.6	0.2	0.1	-
6	3	6	0.4	0.2	-	-
7	5	7	0.3	0.2	0.2	0.1
8	4	8	0.2	0.2	0.2	-
9	3	9	0.1	0.3	-	-
10	5	10	0.2	0.4	0.2	0.05
11	4	11	0.4	0.3	0.1	-
12	3	12	0.5	0.1	-	-
13	5	13	0.3	0.2	0.2	0.05
14	4	14	0.4	0.3	0.1	-
15	3	15	0.1	0.4	-	-
16	5	16	0.2	0.5	0.1	0.05
17	4	17	0.3	0.6	0.05	-
18	3	18	0.5	0.1	-	-
19	5	19	0.3	0.1	0.1	0.2

20	4	20	0.1	0.2	0.4	-

Задача 2. На виході джерела повідомлення появляються парами. До того ж перше повідомлення є незалежним, а поява другого повідомлення залежить від того, яким було перше повідомлення. Для визначення значень безумовних ймовірностей появи на першій позиції повідомлень $a^{(1)}$ і $b^{(1)}$ виберіть з табл. 3.1 $P(a_1)$ Вашого варіанта. Тоді $P\left(a^{(1)}\right) = P(a_1)$, а $P\left(b^{(1)}\right) = 1 - P(a_1)$. Дослідіть характер зміни ентропії і надлишковості джерела повідомлень з переходом від режиму формування незалежних повідомлень (коефіцієнт кореляції між сусідніми повідомленнями дорівнює 0) до режиму, коли між сусідніми повідомленнями існує залежність (статистичний зв'язок), причому ймовірність появи наступного повідомлення залежить від появи тільки одного попереднього повідомлення. Розгляньте два випадки:

а) Ймовірність того, що наступним появиться повідомлення $a^{(2)}$ за умови, що попереднім було повідомлення $a^{(1)}$ дорівнює ймовірності того, що наступним появиться повідомлення $b^{(2)}$ за умови, що попереднім було повідомлення $b^{(1)}$, тобто $P\left(a^{(2)} \middle| a^{(1)}\right) = P\left(b^{(2)} \middle| b^{(1)}\right)$. І ймовірність того, що наступним появиться повідомлення $a^{(2)}$ за умови, що попереднім було повідомлення $b^{(1)}$ дорівнює ймовірності того, що наступним появиться повідомлення $b^{(2)}$ за мови що попереднім було повідомлення $a^{(1)}$, тобто $P\left(a^{(2)} \middle| b^{(1)}\right) = P\left(b^{(2)} \middle| a^{(1)}\right)$.

Вхідні дані для розрахунків згідно з варіантом необхідно вибрати з табл.8.2.

Таблиця 8.2 – Значення умовних ймовірностей появи повідомлень на виході джерела

Варіант	$P\left(a^{(2)} \middle\| a^{(1)}\right) = P\left(b^{(2)} \middle\| b^{(1)}\right)$	$P\left(a^{(2)} \middle\| b^{(1)}\right) = P\left(b^{(2)} \middle\| a^{(1)}\right)$
1	0,7	0,3
2	0,2	0,8
3	0,9	0,1
4	0,3	0,7
5	0,6	0,4
6	0,8	0,2
7	0,4	0,6
8	0,1	0,9
9	0,75	0,25
10	0,15	0,85
11	0,95	0,05

12	0,35	0,65
13	0,55	0,45
14	0,85	0,15
15	0,65	0,35

б) Ймовірність того, що наступним появиться повідомлення $a^{(2)}$ за умови, що попереднім було повідомлення $a^{(1)}$ не дорівнює ймовірності того, що наступним появиться повідомлення $b^{(2)}$ за умови, що попереднім було повідомлення $b^{(1)}$, тобто $P\left(a^{(2)}\left|a^{(1)}\right.\right) \neq P\left(b^{(2)}\left|b^{(1)}\right.\right)$. І ймовірність того, що наступним появиться повідомлення $a^{(2)}$ за умови, що попереднім було повідомлення $b^{(1)}$ не дорівнює ймовірності того, що наступним появиться повідомлення $b^{(2)}$ за мови що попереднім було повідомлення $a^{(1)}$, тобто $P\left(a^{(2)}\left|b^{(1)}\right.\right) \neq P\left(b^{(2)}\left|a^{(1)}\right.\right)$.

Вхідні дані для розрахунків згідно з варіантом необхідно вибрати з табл.8.3.

Таблиця 8.3 – Значення умовних ймовірностей появи повідомлень на виході джерела

Варіант	$P\left(a^{(2)}\left\|a^{(1)}\right.\right)$	$P\left(b^{(2)}\left\|a^{(1)}\right.\right)$	$P\left(b^{(2)}\left\|b^{(1)}\right.\right)$	$P\left(a^{(2)}\left\|b^{(1)}\right.\right)$
1	0,7	0,3	0,1	0,9
2	0,9	0,1	0,3	0,7
3	0,2	0,8	0,75	0,25
4	0,6	0,4	0,15	0,85
5	0,8	0,2	0,65	0,35
6	0,4	0,6	0,95	0,05
7	0,1	0,9	0,85	0,15
8	0,3	0,7	0,55	0,45
9	0,75	0,25	0,9	0,1
10	0,15	0,85	0,4	0,6
11	0,95	0,05	0,8	0,2
12	0,35	0,65	0,65	0,35
13	0,55	0,45	0,45	0,55
14	0,85	0,15	0,15	0,85
15	0,65	0,35	0,35	0,65

Рекомендації до формування методик розв'язання задач

3.1. Розв'язуючи задачу 1, невідомі значення $P(a_m)$ визначте з умови, що повідомлення джерела повідомлень становлять повну групу подій.

$$P(a_1) + P(a_2) + .. + P(a_m) = 1$$

$$P(a_i) = 1 - \sum_{k-1}^{m-1} P(a_k)$$

Знайти ентропію джерела $H(A)$, максимальне значення ентропії $H_{max}(A)$ та продуктивність R_∂ джерела повідомлень. Ентропію джерела обчислюють за формулою

$$H(A) = \sum_{k=1}^{m} P(a_k) \log_2 \frac{1}{P(a_k)}.$$

Виконуючи розрахунки функції $\log_2 X$, можемо застосувати формулу

$$\log_2 X = \frac{\lg X}{\lg 2} = 3{,}32 \lg X$$

Щоб ентропія була максимальною, потрібно, щоб усі повідомлення джерела мали однакову ймовірність появи:

$$P(a_1) = P(a_2) = .. = P(a_m)$$

Продуктивність джерела визначається так:

$$R_\partial = \frac{H(A)}{T},$$

де T – тривалість повідомлення.

Знайти надлишковість джерела повідомлень

$$\rho = 1 - \frac{H(A)}{H_{max}(A)}.$$

3.2. Виконуючи задачу 2, ймовірності появи на другій позиції повідомлень $a^{(2)}$ і $b^{(2)}$ визначайте за формулою повної ймовірності для залежних повідомлень

$$P\left(a^{(2)}\right) = P\left(a^{(1)}\right) P\left(a^{(2)} \middle| a^{(1)}\right) + P\left(b^{(1)}\right) P\left(a^{(2)} \middle| b^{(1)}\right),$$

і відповідно

$$P\left(b^{(2)}\right) = P\left(a^{(1)}\right) P\left(b^{(2)} \middle| a^{(1)}\right) + P\left(b^{(1)}\right) P\left(b^{(2)} \middle| b^{(1)}\right).$$

Для випадку «а» розрахунок ймовірностей появи на другій позиції повідомлень $a^{(2)}$ і $b^{(2)}$ виконайте крім даних свого варіанта і для двох сусідніх варіантів. Метою такого розрахунку є оцінювання характеру їх зміни.

Для оцінювання характеру зміни ентропії і надлишковості джерела у випадках «а» і «б», обчисліть реальну ентропію і надлишковість за умови, що поява повідомлень на другій позиції є незалежною.

Контрольні запитання для формування висновків до роботи

1. Як змінити параметри джерела, щоб його ентропія досягла максимального значення?
2. Як визначити ймовірність появи m-го повідомлення джерела, коли є відомі ймовірності появи всіх повідомлень від 1 до m-1?
3. Що означає фраза «алфавіт джерела повідомлень складається з m символів»?
4. Які особливості на розв'язання задачі накладає умова «всі символи алфавіту незалежні один від одного»?
5. Які вхідні дані необхідні для розрахунку продуктивності джерела повідомлень?
6. Яка розмірність ентропії?

Практичне заняття 9

Розрахунок статистичних параметрів дискретних каналів зв'язку

Мета заняття:набуття практичних навичок розрахунку статистичних параметрів дискретних каналів зв'язку

Постановка задач

По дискретному двійковому симетричному каналу зв'язку із завадами в моменти часу, визначені сигналами синхронізації, передається один з двох сигналів, які умовно позначимо X і Y. Як приклад сигнали телеграфного коду Бодо. На передавальній стороні (ПРД) сигнали X і Y є випадковою послідовністю, однак вважаються відомими ймовірності їх появи, які позначимо, відповідно $P(X), P(Y)$. Ці ймовірності можуть бути визначені на основі попереднього вивчення статистики цього джерела повідомлень. Для розрахунків приймемо $P(X) = P(Y) = 0{,}5$.

Між передавальним (ПРД) і приймальним (ПРМ) пристроями розміщені дві ретрансляційні станції РТС-1 і РТС-2.

Через наявність завад на кожній з дільниць каналу зв'язку ПРД – РТС-1. РТС-1 – РТС-2, РТС-2 – ПРМ можливе неправильне приймання сигналів X та Y, яке характеризується ймовірністю помилки q. Приймемо, що на всіх дільницях і для обох сигналів ймовірність помилки є однаковою. Тоді ймовірність правильного приймання на кожній дільниці дорівнює $p = 1 - q$.

1. Необхідно дослідити і визначити:

а) який з двох сигналів X чи Y був переданий, якщо на РТС-1 прийняли сигнал X1?

б) який з двох сигналів X чи Y був переданий, якщо на ПРМ було прийнято сигнал X3?

2. Необхідно дослідити залежність ймовірності повної помилки приймання сигналів у пунктах РТС-1, РТС-2 і ПРМ від ймовірності правильного приймання сигналу.

3. Необхідно визначити імовірності правильного приймання обох сигналів у пункті РТС-1, одночасно в пунктах РТС-1 і РТС-2, а також одночасно в пунктах РТС-1, РТС-2 і ПРМ.

Вхідні дані потрібно вибрати з табл.9.1.

Таблиця 9.1 – Значення ймовірностей правильного приймання сигналів

Варіант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	0.6	0.65	0.7	0.75

Рекомендації до формування методики розв'язання задачі

Для формування відповіді на перше запитання необхідно визначити ймовірність того, що був переданий сигнал X, за умови, якщо був прийнятий сигнал $X1$ і ймовірність того, що був переданий сигнал Y, якщо було прийнято сигнал $X1$. Порівняння цих ймовірностей дає змогу відповісти на запитання 1а. Аналогічно формується відповідь на запитання 1б.

Ймовірність того, що був переданий сигнал X, якщо прийнято сигнал $X1$ визначають за формулою Байєса, яку для цього випадку запишемо у вигляді

$$P\left(X/_{X1}\right) = \frac{P(X)P(\frac{X1}{X})}{P(Y)P\left(\frac{X1}{Y}\right) + P(X)P(\frac{X1}{X})},$$

де $P\left(\frac{X1}{X}\right) = p$, $P\left(\frac{X1}{Y}\right) = q$.

Аналогічно визначаємо ймовірність того, що був переданий Y, якщо було прийнято сигнал $X1$:

$$P\left(Y/_{X1}\right) = \frac{P(Y)P(\frac{X1}{Y})}{P(X)P\left(\frac{X1}{X}\right) + P(Y)P(\frac{X1}{Y})}.$$

Ймовірність того, що був переданий сигнал X, якщо було прийнято сигнал $X3$ визначаємо також за формулою Байєса, яку за заданих умов запишемо у вигляді

$$P\left(X/_{X3}\right) = \frac{P(X)P(\frac{X3}{X})}{P(X)P\left(\frac{X3}{X}\right) + P(Y)P(\frac{X3}{Y})}.$$

Аналогічно визначимо ймовірність того, що був переданий сигнал Y, якщо було прийнято сигнал $X1$:

$$P\left(Y/_{X3}\right) = \frac{P(Y)P(\frac{X3}{Y})}{P(X)P\left(\frac{X3}{X}\right) + P(Y)P(\frac{X3}{Y})}.$$

Значення ймовірностей того, що буде прийнято сигнал $X3$, якщо передано

сигнал X чи Y, визначається за формулою повної ймовірності

$$P\left(X3/X\right) = P\left(\frac{X1}{X}\right)P\left(\frac{X2}{X1}\right)P\left(\frac{X3}{X2}\right) + P\left(\frac{X1}{X}\right)P\left(\frac{Y2}{X1}\right)P\left(\frac{X3}{Y2}\right) + P\left(\frac{Y1}{X}\right)P\left(\frac{X2}{Y1}\right)P\left(\frac{X3}{X2}\right) + P\left(\frac{Y1}{X}\right)P\left(\frac{Y2}{Y1}\right)P\left(\frac{X3}{Y2}\right),$$

аналогічно

$$P\left(X3/Y\right) = P\left(\frac{Y1}{Y}\right)P\left(\frac{Y2}{Y1}\right)P\left(\frac{X3}{Y2}\right) + P\left(\frac{Y1}{Y}\right)P\left(\frac{X2}{Y1}\right)P\left(\frac{X3}{X2}\right) + P\left(\frac{X1}{Y}\right)P\left(\frac{X2}{X1}\right)P\left(\frac{X3}{X2}\right) + P\left(\frac{X1}{Y}\right)P\left(\frac{Y2}{X1}\right)P\left(\frac{X3}{Y2}\right).$$

Друге завдання передбачає визначення ймовірностей повної помилки приймання сигналів у пунктах РТС-1, РТС-2 і ПРМ, які можна визначити за такими формулами:

$$P_{PTC-1} = P(X)P\left(\frac{Y1}{X}\right) + P(Y)P(\frac{X1}{Y}).$$

$$P_{PTC-2} = P(X)P\left(\frac{Y2}{X}\right) + P(Y)P(\frac{X2}{Y}).$$

$$P_{ПРМ} = P(X)P\left(\frac{Y3}{X}\right) + P(Y)P(\frac{X3}{Y}).$$

Для виконання третього завдання, застосуємо формули

$$P_{PTC-1} = P(X)P\left(\frac{X1}{X}\right) + P(Y)P(\frac{Y1}{Y}).$$

$$P_{PTC-2} = P(X)P\left(\frac{X1,X2}{X}\right) + P(Y)P(\frac{Y1,Y2}{Y}).$$

$$P_{ПРМ} = P(X)P\left(\frac{X1,X2,X3}{X}\right) + P(Y)P\left(\frac{Y1,Y2,Y3}{Y}\right),$$

де $P\left(\frac{X1,X2}{X}\right)$ – умовна ймовірність правильного приймання переданого сигналу X в пунктах РТС-1 і РТС-2 одночасно, аналогічно $P(\frac{Y1,Y2}{Y})$;

$P\left(\frac{Y1,Y2,Y3}{Y}\right)$ – умовна ймовірність правильного приймання переданого'сигналу X в пунктах РТС-1, РТС-2 і ПРМ одночасно; аналогічно

$P\left(\frac{Y1,Y2,Y3}{Y}\right)$.

Контрольні запитання для формування висновків до роботи

1. На основі чого Ви робите висновок про те, який з двох сигналів був переданий X чи Y, якщо в приймальному пристрої зафіксовано сигнал $X3$?
2. Поясніть математичні терміни «апостеріорна ймовірність» та «апріорна ймовірність».
3. Які висновки ви зробили на підставі дослідження ймовірності повної помилки від ймовірності правильного приймання сигналу в різних точках каналу зв'язку?
4. Запишіть формулу для визначення ймовірності правильного приймання сигналу Y одночасно в пунктах РТС-1, РТС-2 і ПРМ.
5. Запишіть формулу для визначення ймовірності повної помилки у разі приймання сигналів X та Y в пункті РТС-2.

Практичне заняття 10

Розрахунок пропускної здатності дискретних каналів зв'язку

Мета заняття: набуття практичних навичок розрахунку пропускної здатності дискретних каналів зв'язку

Постановка задачі

Для джерела повідомлень заданого в задачі практичного заняття 8 знайти пропускну здатність каналу зв'язку, якщо відомий час передавання одного біта інформації. Розраховувати за умови, що цей канал зв'язку без завад. Здійснити кодування символів x_i, і розрахувати реальне значення швидкості передавання інформації. Порівняти одержані результати і зробити висновки. Варіанти завдань наведено в табл. 10.1.

Таблиця 10.1 – Варіанти завдань

Номер варіанта	Тривалість передавання одного біта інформації, Т, сек
1	2
2	3
3	4
4	5
5	6
6	7
7	8
8	9
9	10
10	12
11	11
12	15
13	13
14	14
15	16

Рекомендації до методики розв'язування цієї задачі

1.Знайти ентропію та максимальну ентропію джерела повідомлень: $H(X), H_{max}(X)$.

2. Знайти швидкість B та максимальну швидкість B_{max} передавання інформації. Швидкість передавання інформації джерелом повідомлень визначається як

, (біт/сек)

де $H(X)$ – ентропія джерела повідомлень; Т – середня тривалість одного повідомлення.

3. Знайти пропускну здатність каналу зв'язку. Найбільша можлива швидкість передавання інформації для цього каналу називається його пропускною здатністю. Її вимірюють у біт/сек $C = B_{max}$, *(біт/сек).*

4. Середня кількість інформації, яку передає канал за одиницю часу, називається швидкість передавання інформації Швидкість введення інформації в канал (потік інформації) не повинен перевищувати пропускну здатність каналу, інакше частину інформації буде втрачено.

5. У каналі без завад кожному вхідному символу x_i відповідатиме певний символ на виході y_i,. Отже, середня кількість інформації, яка на виході каналу дорівнюватиме ентропії символів на виході,

$$I(Y) = H(Y),$$

а пропускна здатність каналу без завад визначатиметься, як

$$C = \left\{\frac{H(Y)}{T}\right\}_{max}, \text{(біт/сек)}.$$

6. Здійснити нерівномірне кодування символів та розрахувати досягнуту швидкість введення інформації. Як очевидно з виразу значення С буде максимальне за зменшення середнього часу передавання одного символу і збільшення величини ентропії символів y_i. Якщо мінімальна тривалість передавання Т є відомою величиною, яку можна розрахувати і яка залежить від параметрів конкретного каналу, то інший спосіб збільшення пропускної здатності каналу – це кодування вхідних символів для збільшення величини H(X). Це досягається нерівномірним кодуванням, коли символ з більшою ймовірністю кодується меншою кількістю біт, і навпаки символ з меншою ймовірністю кодується більшою кількістю біт.

Контрольні запитання для формування висновків до роботи

1. Що таке канал зв'язку?
2. У чому полягає теорема Шеннона?
3. Чому збільшення пропускної здатності каналу зв'язку за рахунок зменшення тривалості імпульсу має обмеження?
4. Як зміниться пропускна здатність каналу зв'язку без завад, якщо до сигналу додасться адитивна завада?
5. Від яких параметрів залежить пропускна здатність каналу зв’язку.

Практичне заняття 11

Проектування завадостійкого циклічного коду та перевірка його властивостей

Мета заняття: набуття практичних навичок проектування завадостійкого циклічного коду та перевірка його властивостей

Постановка задачі

Вам необхідно сформувати дозволені кодові комбінації циклічного коду для заданих двох повідомлень, поданих кодовими комбінаціями простою коду, які забезпечують можливість виправляти однократну помилку.

Перевірте можливості сформованих дозволених кодових комбінацій щодо виявлення та виправлення помилок.

Вхідні дані згідно з варіантом необхідно вибрати з табл. 11.1.

Таблиця 11.1 – Кодові комбінації простого коду

Варіант	Повідомлення 1	Повідомлення 2
1	10001	00110
2	10101	00001
3	11000	10000
4	10111	10101
5	11111	01010
6	11110	00010
7	11011	00011
8	01111	10100
9	01100	11000
10	00001	11100
11	10000	10001
12	10010	10011
13	10100	00111
14	11100	10110
15	00100	11001

У всіх варіантах однієї групи необхідно використати один породжуючий поліном:

для групи ТР-23 $P(x) = x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$

для групи ТР-24 $P(x) = x^5 + x^2 + 1$

для групи ТР-25 $P(x) = x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$

для групи ТР-26

Рекомендації до формування методик розв'язання задач

Формуючи дозволену кодову комбінацію циклічного коду, задану кодову комбінацію простого коду зображаємо математичною моделлю у вигляді полінома $G(x)$. Наприклад, кодовій комбінації 10110 відповідає поліном $G(x) = x^4 + x^2 + x$.

Для визначення кількості перевірочних розрядів скористайтесь тим, що в постановці задачі є заданим породжуючий поліном.

Переміщення заданої кодової комбінації простого коду на позиції інформаційних розрядів дозволеної кодової комбінації здійснюється формуванням добутку $x^r G(x)$.

Математичну модель перевірочної частини дозволеної кодової комбінації знаходимо у вигляді залишку від ділення добутку $x^r G(x)$ на породжуючий поліном $P(x)$.

Тепер математичну модель дозволеної кодової комбінації можна подати поліномом $F(x) = x^r G(x) + R(x)$, де $R(x)$ – математична модель перевірочної частини.

Отримана так математична модель дозволеної кодової комбінації однозначно визначає відповідну кодову комбінацію.

Перевіряти можливості спроектованою Вами циклічного коду щодо виправлення помилок необхідно в такому порядку:

а) для обох повідомлень сформуйте множину заборонених кодових комбінацій, які виникають внаслідок однократної помилки;

б) для кожної забороненої кодової комбінації запишіть математичну модель $H_i(x)$;

в) знайдіть залишки від ділення поліномів $H_i(x)$ на породжуючий поліном $P(x)$;

г) результати дослідження подайте у вигляді впорядкованої таблиці і після її аналізу зробіть висновки про можливості циклічного коду щодо виправлення помилок.

Контрольні запитання для формування висновків

1. Чи можна поліном $P(x) = x^7 + x^6 + x$ використати як породжуючий під час формування циклічного коду?

2. Яка умова визначає максимальний степінь породжуючого полінома для циклічного коду заданої довжини?

3. Яка кодова комбінація називається забороненою?

4. Як визначити кількість помилок, які може виправити циклічний код, якщо його мінімальна кодова відстань $d_{min} = 4$?

5. Чому код називається циклічним?

6. Чи відповідає мінімальна кодова відстань між визначеними Вами дозволеними кодовими комбінаціями умові виправлення однократної помилки в кодовій комбінації?

7. На основі чого Ви бачите можливість виправляти однократну помилку у спроектованому Вами завадостійкому циклічному коді?

8. Яку позитивну ознаку має процедура виправлення помилок у спроектованому Вами завадостійкому циклічному коді?

Практичне заняття 12

Розрахунок завадостійкості систем з різними видами модуляції у разі кореляційного приймання цифрових радіосигналів

Мета заняття: набуття практичних навичок розрахунку завадостійкості систем з різними видами модуляції

Постановка задачі

Порівняти завадостійкість приймачів цифрових радіосигналів за параметром імовірності появи помилок P_n для різних способів модуляції, а саме: АМ-2, ЧМ-2 і ВФМ-2. За результатами порівняння побудувати таблицю і вибрати приймач, який забезпечує найвищу завадостійкість.

Варіанти завдань наведено в табл.12.1.

Таблиця 12.1 – Варіанти завдань

№ варіанта	Задані імовірності появи помилки, 10^{-3}
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	0,1
7	0,2
8	0,3
9	0,4
10	0,6
11	0,7
12	0,8
13	0,02
14	0,05
15	0,09

Рекомендації до формування методики розв'язання задачі

1. Ймовірності помилки приймання символу для різних способів модуляції:

а) АМн: $p = 0{,}5 \cdot \left(1 - \Phi\left(\frac{h}{2}\right)\right)$,

б) ЧМн: $p = 0{,}5 \cdot \left(1 - \Phi(h)\right)$,

в) ВФМн: $\Phi \quad \overline{h}$,

де $\Phi(x)$ – функція Крампа: $\Phi(h) = 1 - 1{,}3 \cdot e^{(-0{,}44 \cdot (h+0{,}75)^2)}$,

$h = \sqrt{\frac{E}{\sigma^2}}$ – відношення сигнал/шум.

2. Змінювати відношення сигнал/шум від 1 до 20 дБ.

3. Перерахувати зміну відношення сигнал/шум з дБ в рази, пам'ятаючи, що $h_{\partial Б} = 10 \cdot lg\left(\frac{E}{\sigma^2}\right)$.

4. Підставити h (в разах) в формули, подані в п. 3.1. За отриманими даними побудувати залежності $p = f(h_{\partial Б})$.

Контрольні запитання для формування висновків

1. Що таке завадостійкість?
2. Які параметри використовують для оцінювання завадостійкості?
3. Що таке потенційна завадостійкість?
4. Яка різниця між потенційною і реальною завадостійкостями?
5. Яка різниця між когерентним і некогерентним способами приймання сигналів?

Практичне заняття 13

Проектування оптимального узгодженого фільтра для сигналу відомої форми

Мета заняття: набуття практичних навичок проектування оптимального узгодженого фільтра

Постановка задачі

Спроектувати структурно-функціональну схему оптимального узгодженого фільтра (ОУФ) для заданого сигналу відомої форми за заданих параметрів шуму. Побудувати його імпульсну та передавальну характеристики, знайти сигнал на виході ОУФ і подати його осцилограму. Визначити співвідношення сигнал/шум на виході ОУФ. Побудувати функціональну схему ОУФ.

Вхідні дані: Задано сигнали відомої форми (рис.13.1).

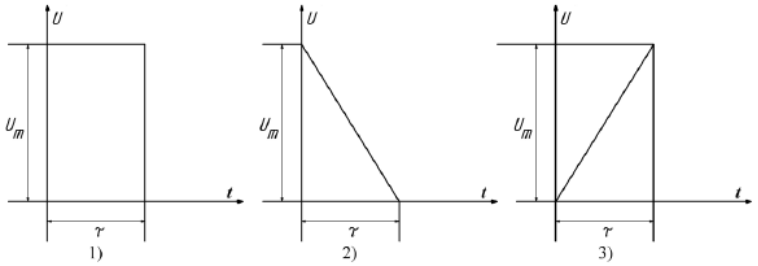


Рисунок 13.1– Сигнали відомої форми

Модель шуму – «білий» шум з спектральною густиною потужності N_0[мВт/Гц].

Таблиця 13.1 – Вхідні дані для варіантів завдань

Варіант	U_m, В	τ, мксек	N_0[мВт/Гц]	Форма сигналу
1	2	9	60	1
2	3	8	70	2
3	4	7	80	3
4	5	6	90	1
5	4,5	5	10	2
6	3,5	4	20	3
7	2,5	3	30	1
8	0,5	2	40	2

9	1,5	1	35	3
10	1	10	50	1
11	5,5	15	15	2
12	6	12	25	3
13	6,5	14	45	1
14	7	13	55	2
15	7,5	11	65	3
16	5	9	25	1
17	4	8	35	2
18	3	7	45	3
19	2	6	50	1
21	1	5	60	2

Рекомендації до формування методики розв'язання задачі

Необхідно записати математичну модель для заданого сигналу відомої форми.

Вибрати тип взаємодії сигналу з шумом, який підходить для цієї задачі.

Визначити імпульсну характеристику для оптимального узгодженого фільтра за умови, що його передавальна характеристика визначається лише за відомої спектральної характеристики відомого сигналу – $S^*(j\omega)$.

$$K(j\omega) = S^*(j\omega)\, \mathrm{e}^{-j\omega\tau}.$$

Знайти сигнал на виході ОУФ, як такий, що відповідає автокореляційній характеристиці вхідного сигналу.

$$S_{\text{вих}}(t) = k\text{B}(\tau) = s_{\text{вих}}(t) \cdot s_{\text{вих}}(t-\tau).$$

Знайти спектральну густину потужності шуму, на виході ОУФ, з якої і знайти дисперсію.

Визначити співвідношення сигнал/шум у момент часу закінчення вхідного сигналу $(t = \tau)$.

Побудувати графіки визначених характеристик.

Контрольні запитання для формування висновків

1. За яким критерієм оптимальності реалізовано оптимальний узгоджений фільтр?
2. Чому у разі зміни параметрів сигналу фільтр перестає бути оптимальним?
3. Яку особливість імпульсної характеристики оптимального узгодженого фільтра Ви знаєте?
4. Яку інформацію інженер одержує з такого твердження: «У каналі зв'язку

діє адитивна суміш сигналу і білого гауссового шуму»?

5. На що в назві «оптимальний узгоджений фільтр» вказує слово «узгоджений»?

Практичне заняття 14

Синтез неперервних детермінованих періодичних сигналів у базисі функцій Уолша

Мета заняття:набуття практичних навичок синтезу неперервних детермінованих періодичних сигналів у базисі функцій Уолша

Постановка задачі

Необхідно сформувати гармонічній сигнал, користуючись методом синтезу сигналу в базисі функцій Уолша. Параметри гармонічного сигналу задані в таблиці 14.1. У всіх варіантах використати перші 16 функцій Уолша. У вигляді графіків подати: визначений спектр гармонічного сигналу в базисі функцій Уолша та осцилограму сформованому сигналу.

Таблиця 14.1 – Параметри синтезованого гармонічного сигналу

Варіанти	U_m, [В]	f,[кГц]	φ, градуси
1	0,8	20	10
2	2,2	30	40
3	1,4	45	30
4	0,9	15	50
5	0,6	10	20
6	1,7	5	60
7	1,3	25	90
8	2,1	35	15
9	1,2	40	35
10	1,9	50	70
11	1,6	75	55
12	0,7	80	25
13	1,0	65	0
14	2,4	70	45
15	1,5	55	65
16	1,7	25	70
17	1,3	33	30
18	2,1	40	20
19	1,2	10	10
20	1,9	15	50
21	1,6	80	60
22	0,7	45	70
23	1,0	50	10

24	2,4	75	25
25	1,5	50	15
26	0,8	80	80
27	2,2	20	35
28	1,4	15	15
29	0,9	80	40
30	0,6	60	60

Рекомендації до формування методики розв'язання задачі

1. Математичну модель сигналу в базисі функцій Уолша можна подати узагальненим рядом Фур'є:

$$s(\theta) = \sum_{i=0}^{\infty} A_i \cdot wal(i, \theta) \qquad (1)$$

де A_i – амплітудний коефіцієнт i-ї складової; $wal(i, \theta)$ – i-та функція Уолша;

а) побудувати осцилограми сигналів для перших 16 функцій Уолша;

б) інтервал подання функцій Уолша потрібно прирівняти до заданого значення періоду Т гармонічного сигналу, який необхідно синтезувати;

в) в розрахунках бажано перейти до безрозмірного часу ($^{t}/_{T}$).

2. Записати математичну модель заданого сигналу $s(t)$ в часовій області.

3. Знайти значення амплітудних коефіцієнтів за формулою:

$$A_i = \int_0^1 s(\theta) \cdot wal(i, \theta) dt \qquad (2)$$

де $\theta = {}^{t}/_{T}$ – безрозмірний час, $T = {}^{2\pi}/_{\omega}$ або $T = {}^{1}/_{f}$ – період заданого сигналу, $\omega = 2\pi f$- кругова частота

4. Побудувати спектр сигналу в базисі функцій Уолша.

5. Записати математичну модель сигналу, апроксимованого вкороченим рядом Фур'є в базисі функцій Уолша:

$$s(\theta) = A_0 \cdot wal(0, \theta) + A_1 \cdot wal(1, \theta) + \cdots + A_0 wal(0, \theta) \qquad (3)$$

Побудувати графік апроксимованого сигналу. Форму синтезованого сигналу визначайте графоаналітичним методом, для чого необхідно зобразити на рисунку всі визначені складові і підсумовуванням ординат знайдіть значення сигналу.

Контрольні запитання для формування висновків

1. Що називаємо порядком функції Уолша ?
2. Яка величина відкладається на осях під час зображення спектральної

характеристики сигналу в базисі функцій Уолша ?

3. Яким способом можна збільшити точність формування заданого сигналу, використовуючи процедуру синтезу за Уолшем ?

4. Яка властивість, притаманна функціям Уолша, є корисною для багатоканального передавання сигналів ?

5. Який вигляд має спектральна характеристика сигналу, подана в базисі функцій Уолша ?

6. Що являють собою функції Уолша і чим обумовлена практична доцільність їх використання в системах передавання

ПОРЯДОК ОЦІНЮВАННЯ ТА ВИМОГИ ДО ЗВІТІВ

Оцінюються повнота виконання завдань, правильність розрахунків, коректність побудованих графіків, обґрунтованість висновків і розуміння здобувачем використаних методів.

Звіт про практичну роботу повинен містити:

– титульний аркуш із назвою дисципліни, номером і темою практичної роботи, даними здобувача та викладача;

– мету роботи та формулювання завдання;

– номер варіанта й вихідні дані;

– основні теоретичні положення та формули, необхідні для розв’язання;

– послідовність розрахунків із поясненнями, одиницями вимірювання та проміжними результатами;

– таблиці, графіки, схеми або осцилограми, передбачені завданням;

– аналіз отриманих результатів і висновки;

– відповіді на контрольні запитання, якщо вони наведені в матеріалах практичного заняття.

Під час захисту здобувач має пояснити методику розв’язання, обґрунтувати вибір формул, прокоментувати графічні залежності та відповісти на запитання за темою роботи.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Гусєв О. Ю., Конахович Г. Ф., Корнієнко В. І., Кузнецов Г. В., Пузиренко О. Ю. Теорія електричного зв'язку. Львів : Магнолія 2006, 2024. 364 с.

2. Основи теорії інформації та кодування : навч. посібник / І. А. Прокопишин, Р. Є. Рикалюк, В. Ф. Чекурін, К. А. Червінка. Львів : ЛНУ ім. Івана Франка, 2023. 156 с.

3. Беркман Л. Н., Варфоломеєва О. Г., Грушевська В. П. Типові сигнали та завади в електрозв'язку. Київ : Державний університет телекомунікацій, 2015. 92 с.

4. Гусєв О. Ю., Конахович Г. Ф., Корнієнко В. І., Кузнецов Г. В., Пузиренко О. Ю. Теорія електричного зв'язку. Київ : НАУ, 2016. 364 с.

5. Іващенко П. В., Перекрестов І. С. Сигнали електрозв'язку : навчальний посібник. Одеса : ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2012. 97 с.

6. Беркман Л. Н., Комарова Л. О., Чумак Н. С. Системи електрозв'язку та сигнали. Київ : Державний університет телекомунікацій, 2015. 91 с.

7. Величко Т. Г., Рубаненко О. О., Явдик В. В. Основи електроніки та мікросхемотехніки. Вінниця : ВНАУ, 2018. 151 с.

ІНФОРМАЦІЙНІ РЕСУРСИ

1. edX – освітня платформа: https://www.edx.org/
2. Репозитарій Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій: https://duikt.edu.ua/ua/reposit
3. Цифрова обробка сигналів, курс Coursera: https://www.coursera.org/learn/dsp1
4. IEEE Xplore Digital Library: https://ieeexplore.ieee.org/
5. IETF RFC Editor: https://www.rfc-editor.org/