Державний комітет зв'язку та інформатизації України

Одеська національна академія зв'язку ім. О.С.Попова

Кафедра теорії електричного зв'язку

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання

комплексного завдання з курсів

"ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ" та

"СИГНАЛИ і ПРОЦЕСИ в РАДІОТЕХНІЦІ"

на тему

"ОПИС СИГНАЛІВ ЕЛЕКТРОЗВ'ЯЗКУ

та РОЗРАХУНКИ ЇХ ХАРАКТЕРИСТИК"

Затверджено
Радою факультету
радіозв'язку, радіомовлення
та телебачення.
Протокол № 4
від 21 грудня 2000 р.

Одеса 2001

УДК 621.372 (075) План НМВ 2001 р.

Рецензент – ***І. В. Хіхловська***

Укладач – ***П. В. Іващенко***

Відп. редактор – ***В. Ю. Дирда***

Редактор – ***Л.А. Кодрул***

Комп’ютерне верстання
та макетування – ***Є.С. Корнійчук***

Схвалено
на засіданні кафедри ТЕЗ
і рекомендовано до друку.
Протокол № 6
від 20 листопада 2000 р.

ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО КЗ

Комплексне завдання (КЗ) виконують студенти, які навчаються за напрямами “Телекомунікації” і “Радіотехніка”; під час вивчення першої частини курсів “Теорія електричного зв’язку” (ТЕЗ) та “Сигнали і процеси в радіотехніці” (СПР). КЗ індивідуальне, студент виконує за варіантом, номер якого збігається з порядковим номером прізвища студента в журналі академічної групи. Рекомендований графік виконання окремих задач:

	Рішення задач				Здача КЗ	Захист КЗ
	Задача 1	Задача 2	Задача 3	Задача 4		
Навчальний тиждень	5	8	12	15	16	17

Конкретні вихідні дані для заданого номера варіанту студент виписує з Додатку А цих вказівок. На час зазначеного терміну виконання окремих задач студент повинен подати керівнику для перегляду матеріали з розв’язанням задач. Роботу студента над КЗ керівник ураховує під час щомісячної атестації з поточної роботи. Повністю виконане КЗ студент оформляє відповідно до правил оформлення текстових документів (Додатки Д, Е). Усі графіки будуються з використанням числових масштабів по осях координат. Оформлене КЗ студент здає керівнику на рецензування і, після позитивної рецензії, захищає його. Зараховане КЗ разом із зарахованими практичними й лабораторними заняттями є умовою допуску студента до іспиту чи заліку по першій частині курсу СПР або ТЕЗ.

ЗМІСТ КЗ

КЗ складається з чотирьох задач.

Задача 1. Імпульсний сигнал $s(t)$ заданий аналітичним виразом, що визначає його форму. Це може бути імпульс: ГАУССІВ, ДВОСТОРОННІЙ ЕКСПОНЕНЦІЙНИЙ, ТРИКУТНИЙ, КОСИНУС, КОСИНУС-КВАДРАТ або ПІДНЯТИЙ КОСИНУС. Задані також два числа: A (мВ), що визначає амплітуду імпульсу, та b (мс), що визначає швидкість зміни сигналу. Необхідно:

а) розрахувати і побудувати графік сигналу $s(t)$, визначити його тривалість;

б) знайти вираз для спектральної густини сигналу $S(j\omega)$. Побудувати графік амплітудного спектра $|S(f)| = |S(j2\pi f)|$ для області значень $f \geq 0$;

в) визначити ширину спектра сигналу $F_{\max}$, як протяжність інтервалу $(0, F_{\max})$, поза яким нормовані значення амплітудного спектра $|S(f)|$ / $S(0)$ не перевищують задане значення y.

Задача 2. Сигнал $s(t)$ заданий у задачі 1, там же визначено $F_{\max}$. Необхідно:

а) визначити інтервал дискретизації $T_д$, надати таблицю відліків $s(kT_д)$, побудувати графік дискретного сигналу $s_д(t)$;

б) визначити частоту дискретизації $f_д$ та побудувати графік амплітудного спектра відліків для області частот $0 \leq f \leq 2f_д$. Показати на графіку граничні частоти смуги пропускання і смуги затримки фільтра, який відновлює сигнал за відліками;

в) навести схеми аналого-цифрового перетворювача (АЦП) та цифроаналогового перетворювача (ЦАП); пояснити принципи аналого-цифрового та цифроаналогового перетворень; подати сигнал $s(t)$ цифровим сигналом, визначити тривалість двійкового символу $T_б$.

Задача 3. Несівне коливання заданої амплітуди A_0 = 1 В піддається аналоговій модуляції заданого виду (АМПЛІТУДНІЙ, БАЛАНСНІЙ, ОДНОСМУГОВІЙ, ЧАСТОТНІЙ або ФАЗОВІЙ). Модулюючим сигналом у разі АМ, БМ і ОМ є сигнал $s(t)$, заданий у задачі 1, а в разі ЧМ та ФМ – гармонічне коливання частоти F_{max}, знайденої в задачі 1. У разі ЧМ задана девіація частоти, а в разі ФМ – девіація фази. Необхідно:

а) побудувати графік амплітудного спектра модульованого сигналу (значення частоти несівного коливання $f_о$ вибирається за умови, що $f_0 >> F_{max}$);

б) розрахувати ширину спектра модульованого сигналу і показати її на графіку спектра;

в) зобразити і описати схему (функціональну або структурну) модулятора заданого виду модуляції;

г) зобразити і описати схему (функціональну або структурну) детектора заданого виду модуляції.

Задача 4. Зобразити і описати схему модулятора заданого сигналу цифрової модуляції (АМ-2, ЧМ-2 або ФМ-2). Модулятор повинен містити фільтр, призначений для обмеження спектра модульованого сигналу, включений або в коло модулюючого сигналу, або в коло модульованого сигналу. Розрахувати смугу пропускання такого фільтра, якщо модулюючий сигнал – це цифровий сигнал, для якого в задачі 3 визначена тривалість двійкового символу. Розрахувати ширину спектра модульованого сигналу.

ВКАЗІВКИ ДО РОЗВ’ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ 1

Задача 1 відноситься до розділу “Спектральний аналіз неперіодичних сигналів за допомогою перетворення Фур’є”. Деякі відомості про спектральне представлення неперіодичних сигналів наведені в літературі [1, розд. 2.6, 2.10; 2, розд. 2.2; 3, розд. 2.3, Додаток 3; 4, розд. 2.3, Додаток Д3.

Розрахунок і побудова графіка заданого сигналу $s(t)$

Загальний вигляд сигналів, які зустрічаються під час виконання КЗ, подано в Додатку Б. Необхідно побудувати графік із використанням числових масштабів по осях координат. Задана функція $s(t)$ парна, тому для побудови графіка досить розрахувати точки для $t \geq 0$. Під час вибору значень змінної t слід урахововувати швидкість зміни заданої функції $s(t)$.

У разі гауссового та двостороннього експоненційного імпульсів, ураховуючи, що $e^0 = 1$, $e^{-1} = 0{,}368$; $e^{-2} = 0{,}135$; $e^{-3} = 0{,}050$; $e^{-4} = 0{,}018$, значення t вибирають таким чином, щоб аргумент експоненти приймав значення від 0 до 4 з кроком 0,5 чи 1.

У разі косинус-імпульсу та косинус-квадрат імпульсу значення t вибирають так, щоб аргумент косинуса приймав значення 0; $\pi/8$; $\pi/4$; $3\pi/8$; $\pi/2$. У разі піднятого косинус-імпульсу – значення 0; $\pi/4$; $\pi/2$; $3\pi/4$; π.

Приклад 1. Заданий сигнал – степеневий імпульс

$$s(t)=\begin{cases} A[1-(2t/b)^2], & |t| \le b/2, \\ 0, & |t| > b/2, \end{cases}$$

де A = 50 мВ, b = 80 мс.

З аналітичного опису видно, що функція $s(t)$ парна, максимальне значення імпульсу $s(0) = A$. При зміні t від 0 до $b/2$ функція $s(t)$ монотонно зменшується, тому досить розрахувати 2 чи 3 проміжні точки. Результати розрахунків подано у табл. 1.

Таблиця 1 – Розрахункові значення степеневого імпульсу $s(t)$

t, мс	0	10	20	30	40
$s(t)$, мВ	50	46,9	37,5	21,9	0

Побудований за точками табл. 1 графік $s(t)$ наведено на рис. 1.

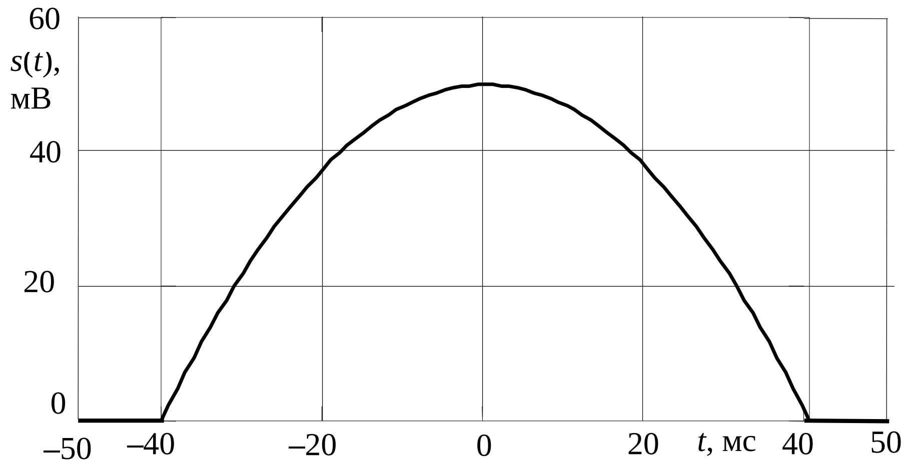


Рисунок 1 – Графік заданого степеневого імпульсу

Отримання виразу для спектральної густини заданого сигналу

Оскільки заданий сигнал – функція парна, то доцільно використати косинус перетворення Фур'є

$$S(\omega)=2\int_0^{\infty} s(t)\cos(\omega t)\mathrm{d}t\ .$$

У Додатку Г наведені деякі співвідношення, які допоможуть виконати математичні перетворення. Рекомендується інтегрування виконати у загальному вигляді, а числові дані підставити у кінцевий результат. Для отримання кінцевого виразу слід перейти до частоти f, виконавши заміну $\omega = 2\pi f$.

У Додатку В наведені кінцеві вирази для спектральної густини $S(f)$, як довідкові дані для самоперевірки.

Приклад 2. Знайдемо спектральну густину для сигналу, використаного у прикладі 1.

$$S(\omega)=2\int_0^{b/2} A[1-(2t/b)^2]\cos(\omega\, t)d\,t \;=2\,A\int_0^{b/2}\cos(\omega\, t)d\,t\;-\;\frac{8A}{b^2}\int_0^{b/2} t^2\cos(\omega\, t)d\,t\;=$$

$$=2\,A\,\frac{\sin(\omega\, t)}{\omega}\Bigg|_0^{b/2}\;-\;\frac{8A}{b^2}\left[\frac{2t}{\omega^2}\cos(\omega\, t)+\left(\frac{t^2}{\omega}-\frac{2}{\omega^3}\right)\sin(\omega\, t)\right]\Bigg|_0^{b/2}=$$

$$=2\,A\left[\frac{\sin\dfrac{\omega\, b}{2}}{\omega}-\frac{4}{b\omega^2}\cos\frac{\omega\, b}{2}-\frac{\sin\dfrac{\omega\, b}{2}}{\omega}+\frac{8}{b^2\,\omega^3}\sin\frac{\omega\, b}{2}\right].$$

Переходячи до змінної f, отримаємо остаточний вираз для спектральної густини

$$S(\,f\,)=\frac{2Ab}{(\pi bf\,)^2}\left(\frac{\sin(\pi bf\,)}{\pi bf}-\cos(\pi bf\,)\right),\qquad -\infty<f<\infty.$$

Побудова графіка амплітудного спектра

Амплітудний спектр – це модуль спектральної густини $|S(f)|$. Для побудови графіка важливо визначитись з кроком для змінної f. Для цього можна скористатись виглядом графіків $|S(f)|$, що наведені в Додатку В. Із цих рисунків видно, що досить прорахувати значення функції $|S(f)|$ для області значень f від нуля до $3/b$. З урахуванням швидкості зміни функції $|S(f)|$ крок для f у 3 – 4 рази менший за $1/b$. Слід обов’язково знайти екстремальні значення функції $|S(f)|$.

Під час розрахунків значень функцій $|S(f)|$ може з’явитись невизначеність типу 0/0. Цю невизначеність можна зняти за відомими математичними правилами. Наведемо деякі з невизначеностей, які зустрічаються під час виконанні КЗ. Вони розкриваються за правилом Лопіталя

$$\lim_{x\to 0}\frac{\sin x}{x}=1;$$

$$\lim_{b\,f\to 0{,}5}\frac{\cos(\pi b\,f\,)}{1-(2b\,f\,)^2}=\frac{-\pi\sin(\pi b\,f\,)}{-2\cdot 2b\,f\,\cdot 2}\Bigg|_{b\,f=0{,}5}=\frac{\pi}{4};$$

$$\lim_{b\,f\to 1}\frac{\sin(\pi b\,f\,)}{1-(b\,f\,)^2}=\frac{\pi\cos(\pi b\,f\,)}{-2b\,f}\Bigg|_{b\,f=1}=\frac{\pi}{2}.$$

Приклад 3. Для знайденої у прикладі 2 спектральної густини побудувати графік амплітудного спектра $|S(f)|$. При $f = 0$ маємо невизначеність 0/0. Покладемо $\pi bf = x$ і розкриємо її

$$\lim_{x\to 0}\frac{\sin x-x\cos x}{x^3}=\frac{\cos x-\cos x+x\sin x}{3x^2}\Bigg|_{x=0}=\frac{\cos x}{3}\Bigg|_{x=0}=\frac{1}{3}.$$

Виберемо для складної змінної πbf крок, що дорівнює $\pi/4$, або крок для $f = 1/(4b)$. З урахуванням, що b = 80 мс, як крок для f приймемо ціле число, а саме 4 Гц. Результати розрахунків зведемо до табл. 2.

Таблиця 2 – Розрахунок графіка амплітудного спектра

f, Гц	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
πbf	0	1,01	2,01	3,02	4,02	5,03	6,03	7,04	8,04	9,05	10,05
$\lvert S(f)\rvert$, мВ/Гц	2,67	2,40	1,73	0,91	0,22	0,16	0,22	0,10	0,04	0,09	0,06

Екстремальне значення функції $\lvert S(f)\rvert$, коли вона приймає нульове значення, має місце при $\sin(\pi bf)/(\pi bf) - \cos(\pi bf) = 0$, або $\mathrm{tg}(\pi bf) = \pi bf$. Добіркою на калькуляторі знайдемо, що перший нуль має місце при $\pi bf_{01} = 4{,}5$;
$f_{01} = 4{,}5/(\pi b) = 4{,}5/(\pi\cdot 0{,}08) = 17{,}9$ Гц.
Розрахований графік $\lvert S(f)\rvert$ наведено на рис. 2.

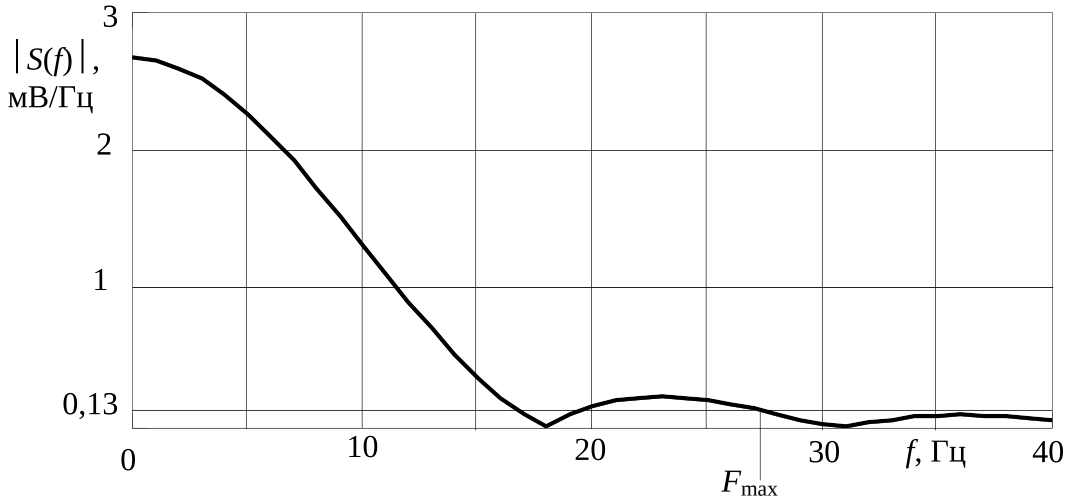


Рисунок 2 – Амплітудний спектр степеневого імпульсу

Визначення максимальної частоти спектра сигналу F_{max}

Частота F_{max} визначається за умови, що значення амплітудного спектра на частотах $f \geq F_{max}$ не перевищують задане значення $y = \lvert S(F_{max})\rvert / S(0)$. Рекомендується F_{max} визначити графічно, хоча для гауссового та двостороннього експоненційного імпульсів F_{max} можна визначити аналітично. Отже, на графіку $\lvert S(f)\rvert$ необхідно указати значення $\lvert S(F_{max})\rvert = y\cdot S(0)$, а потім визначити значення F_{max} на перетині горизонтальної прямої на рівні $\lvert S(F_{max})\rvert$ і графіка $\lvert S(f)\rvert$.

Приклад 4. Для спектра, який розрахований у прикладі 3, визначити F_{max} за умови, що $y = \lvert S(F_{max})\rvert / S(0) = 0{,}05$. Оскільки $S(0) = 2{,}67$ мВ/Гц, $\lvert S(F_{max})\rvert = 2{,}67\cdot 0{,}05 = 0{,}13$ мВ/Гц. На перетині горизонтальної прямої на рівні 0,13 і графіка $\lvert S(f)\rvert$ (рис. 2) знаходимо, що $F_{max} = 27$ Гц.

ВКАЗІВКИ ДО РОЗВ’ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ 2

Задача 2 пов’язана з двома темами курсу. Це “Теорема Котельникова” та “АЦП та ЦАП”. Відповідні відомості про ці теми можна знайти в літературі [1, розд. 2.15 – 2.17, 12.10, 12.11; 2, розд. 5.2, 15.1; 3, розд. 2.4, 16.2; 4, розд. 2.4, 17.2].

Розрахунок інтервалу дискретизації та відліків сигналу

Відповідно до теореми Котельникова під час дискретизації сигналу $s(t)$ інтервал дискретизації $T_д$ не може перевищувати значення $1/(2F_{max})$, де F_{max} – максимальна частота спектра сигналу $s(t)$. Значення F_{max} знайдено в задачі 1. Доцільно вибрати $T_д = (0,7...0,8)/(2F_{max})$. Цю доцільність добре буде видно нижче з графіка рис. 4 під час визначення граничних частот смуги пропускання та смуги затримки відновлювального ФНЧ.

Відліки сигналу $s(t)$ – це значення $s(kT_д)$,

де $k = k_{min},..., –2, –1, 0, 1, 2,..., k_{max}$; k_{min} і k_{max} – номери граничних відліків, які визначаються за умови, що при $t < k_{min}T_д$ і при $t > k_{max}T_д$ значення $|s(t)|$ менші за половину кроку квантування $\Delta s/2$. Задані в КЗ сигнали – парні функції, тому $k_{min} = – k_{max}$.

Приклад 5. У прикладі 4 знайдено значення максимальної частоти спектра сигналу $s(t)$: F_{max} = 27 Гц. Тоді $T_д = (0,7...0,8)/(2F_{max}) = (0,7...0,8)/(2\cdot 27)$ = (13,0...14,8) мс. Приймемо $T_д$ = 14 мс. Розрахуємо відліки сигналу $s(t)$, аналітичний вираз якого наведено в прикладі 1. Розраховані відліки подано в табл. 3.

Таблиця 3 – Відліки сигналу, квантування відліків та кодування рівнів квантування

k	$kT_д$, мс	$s(kT_д)$, мВ	$s(kT_д)/\Delta s$	$p(kT_д)$	$s_{кв}(kT_д)$, мВ	$\varepsilon_{кв}(kT_д)$, мВ	Кодові комбінації
–2	– 28	25,5	12,75	13	26	+0,5	01101
–1	– 14	43,9	21,95	22	44	+0,1	10110
0	0	50,0	25,0	25	50	0	11001
1	14	43,9	21,95	22	44	+0,1	10110
2	28	25,5	12,75	13	26	+0,5	01101

Графік дискретного сигналу $s_д(t)$, побудованого на основі розрахованих відліків, наведено на рис. 3.

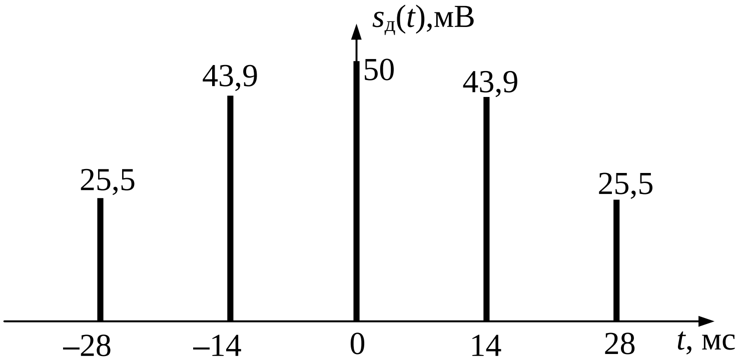


Рисунок 3 – Графік дискретного сигналу

Побудова графіка спектра дискретного сигналу

Для побудови графіка досить пам’ятати, що спектральна густина відліків є сума періодичних повторень з періодом частоти дискретизації $f_д$ спектральної густини неперервного сигналу $S(f)$ помножена на $f_д$ (частота дискретизації $f_д = 1/T_д$ – величина, обернена до інтервалу дискретизації):

$$S_д(f) = f_д \sum_{n=-\infty}^{\infty} S(f - nf_д), \quad -\infty < f < \infty.$$

Під час зображення амплітудного спектра дискретного сигналу визначають модуль $|S_д(f)|$ і показують графік для області значень $f \geq 0$. Для отримання уявлення про спектр $|S_д(f)|$ досить розрахувати часткову суму ряду для членів з номерами n = 0, 1 та 2.

Приклад 6. Спектральну густину неперервного сигналу із прикладу 1 знайдено в прикладі 2, а інтервал дискретизації – у прикладі 5. Частота дискретизації $f_д = 1/T_д = 1/(14{\cdot}10^{-3}) = 71{,}4$ Гц. Заради обчислювальних зручностей під час побудови графіка спектра приймемо $f_д = 70$ Гц.

Будуємо графік спектральної густини $S(f)$ для позитивних та від’ємних частот шляхом нанесення точок графіка рис. 2 – це буде складова ряду з $n = 0$. Потім будуємо два зсунутих вправо на $f_д$ та $2f_д$ графіки – це будуть складові ряду з $n = 1$ та $n = 2$. Амплітудний спектр дискретного сигналу розраховується як модуль суми значень трьох графіків. Розрахунки проводяться для області $0 \leq f \leq 2f_д$. Результати розрахунку $|S_д(f)|$ наведені на рис. 4 (без урахування множника $f_д$). Там же показана АЧХ ФНЧ, який використовується для відновлення неперервного сигналу за відліками (масштаб для значень АЧХ не наводиться). Його параметри – граничні частоти смуги пропускання $f_{сп}$ та смуги затримки $f_{сз}$. Ці параметри вибираються за умов: $f_{сп} \geq F_{max}$, $f_{сз} \leq f_д - F_{max}$. На рис. 4 параметри вибрані за умов рівностей:

$f_{сп} = F_{max} = 27$ Гц, $f_{сз} = f_д - F_{max} = 43$ Гц.

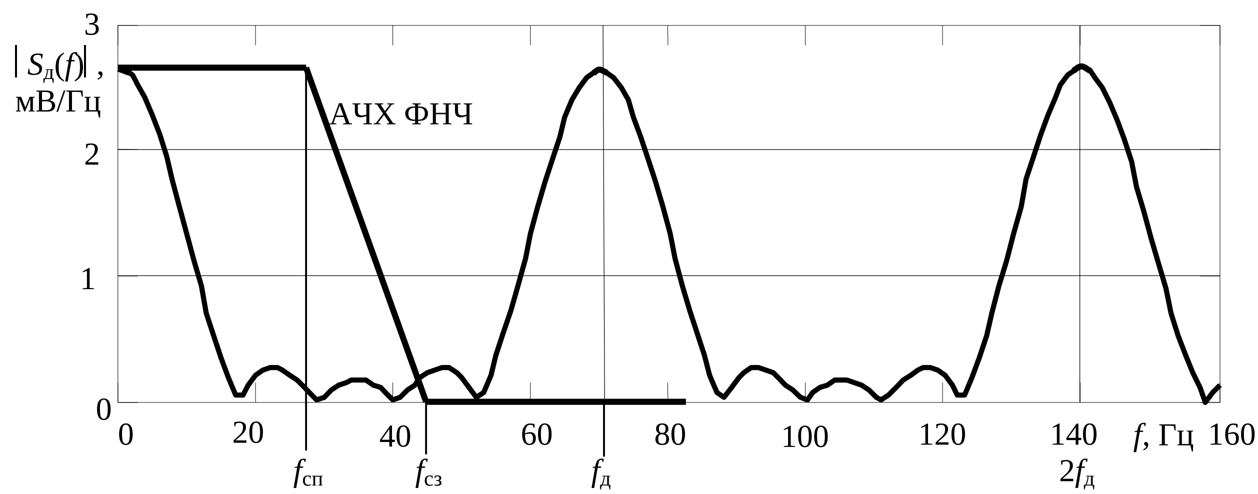


Рисунок 4 – Спектр дискретного сигналу та АЧХ відновлювального ФНЧ

Представлення неперервного сигналу цифровим сигналом

Схема аналого-цифрового перетворювача (АЦП) повинна містити дискретизатор, квантувач та кодер відліків, а схема цифроаналогового перетворювача (ЦАП) – декодер та ФНЧ. Опис перетворень сигналів в АЦП та ЦАП можна знайти в підручниках [3, розд. 16.2], [4, розд. 17.2], [1, розд. 12.10, 12.11].

Для представлення неперервного сигналу цифровим сигналом необхідно виконати квантування відліків $s(kT_д)$ та кодування їх двійковим кодом. У результаті рівномірного квантування квантовані відліки $s_{кв}(kT_д)$ приймають лише значення, кратні кроку квантування Δs: $s_{кв}(kT_д) = p(kT_д)\cdot\Delta s$, де $p(kT_д)$ – ціле число, рівень квантування. Квантування полягає в заміні відліку $s(kT_д)$ найближчим квантованим значенням $s_{кв}(kT_д)$, яке однозначно описується числом $p(kT_д)$. Через таке наближене представлення відліків виникає похибка квантування $\varepsilon_{кв}(kT_д) = s_{кв}(kT_д) - s(kT_д)$. Її значення за модулем не перевищує половини кроку квантування: $|\varepsilon_{кв}(kT_д)| \le \Delta s/2$. Розрахунок рівнів квантування виконується за співвідношенням

$$p(kT_д) = \mathrm{int}\left(\frac{s(kT_д)}{\Delta s} + 0{,}5\right), \quad \text{де } \mathrm{int}\,(x) \text{ – ціла частина від } x.$$

Кодування рівнів квантування полягає в запису $p(kT_д)$ у двійковій системі числення. Код повинен бути рівномірним, тобто всі кодові комбінації повинні мати однакову кількість двійкових символів. Довжина коду n – ціле число, яке вибирається за умови, що $2^n \ge L$, де $L = \dfrac{s_{max}(t) - s_{min}(t)}{\Delta s}$ – кількість рівнів квантування; $s_{max}(t)$ і $s_{min}(t)$ – можливі відповідно максимальне та мінімальне значення сигналу $s(t)$*).

Тривалість двійкового символу визначається простим співвідношенням $T_б = T_д/n$. Для наочності цифровий сигнал слід подати часовою діаграмою.

Приклад 7. Для продовження прикладу 6 виконаємо квантування розрахованих відліків за умови, що крок квантування Δs = 2 мВ, та кодування рівнів квантування. Сигнал $s(t)$, що аналізується, має $s_{max}(t)$ = 50 мВ і $s_{min}(t)$ = 0, звідки

$$L = \frac{s_{max}(t) - s_{min}(t)}{\Delta s} = \frac{50}{2} = 25.$$

За умови, що $2^n \ge L$, довжина коду n = 5.

Результати розрахунків наведені в табл. 3.

На рис. 5 представлена відповідна часова діаграма цифрового сигналу.

Тривалість двійкового символу $T_б = T_д/n$ = 14/5 = 2,8 мс.

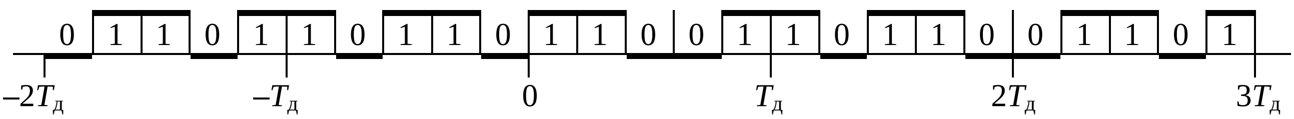


Рисунок 5 – Часова діаграма цифрового сигналу

---

*) За реальних умов, коли сигнал $s(t)$ приймає і від'ємні значення, АЦП перетворює невід'ємний неперервний сигнал $s(t) - s_{min}(t) \ge 0$ в цифровий сигнал. У разі необхідності отримані кодові комбінації після АЦП перетворюються в комбінації, що містять знаковий розряд та модуль відліку.

ВКАЗІВКИ ДО РОЗВ’ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ 3

Задача 3 відноситься до розділу курсу “Аналогові види модуляції гармонічного переносника”. Відомості про часовий та спектральний опис модульованих сигналів можна знайти в [1, розд. 3.1 – 3.6; 2, розд. 4.1, 4.2; 3, розд. 3.1 – 3.4; 4, розд. 3.1 – 3.4; 5, розд. 2, 5]; про побудову модуляторів – в [2, розд. 11.5; 3, розд. 6.5 – 6.8; 4, розд. 6.4 – 6.7; 5, розд. 3, 6]; про побудову детекторів – в [1, розд. 8.9, 8.10; 2, розд. 11.6; 3, розд. 14.1 – 14.5; 4, розд. 15.1 – 15.5; 5, розд. 4, 7].

Побудова графіка спектра модульованого сигналу та розрахунок ширини спектра сигналів АМ, БМ і ОМ не викликає труднощів, це добре описано в переліченій вище літературі.

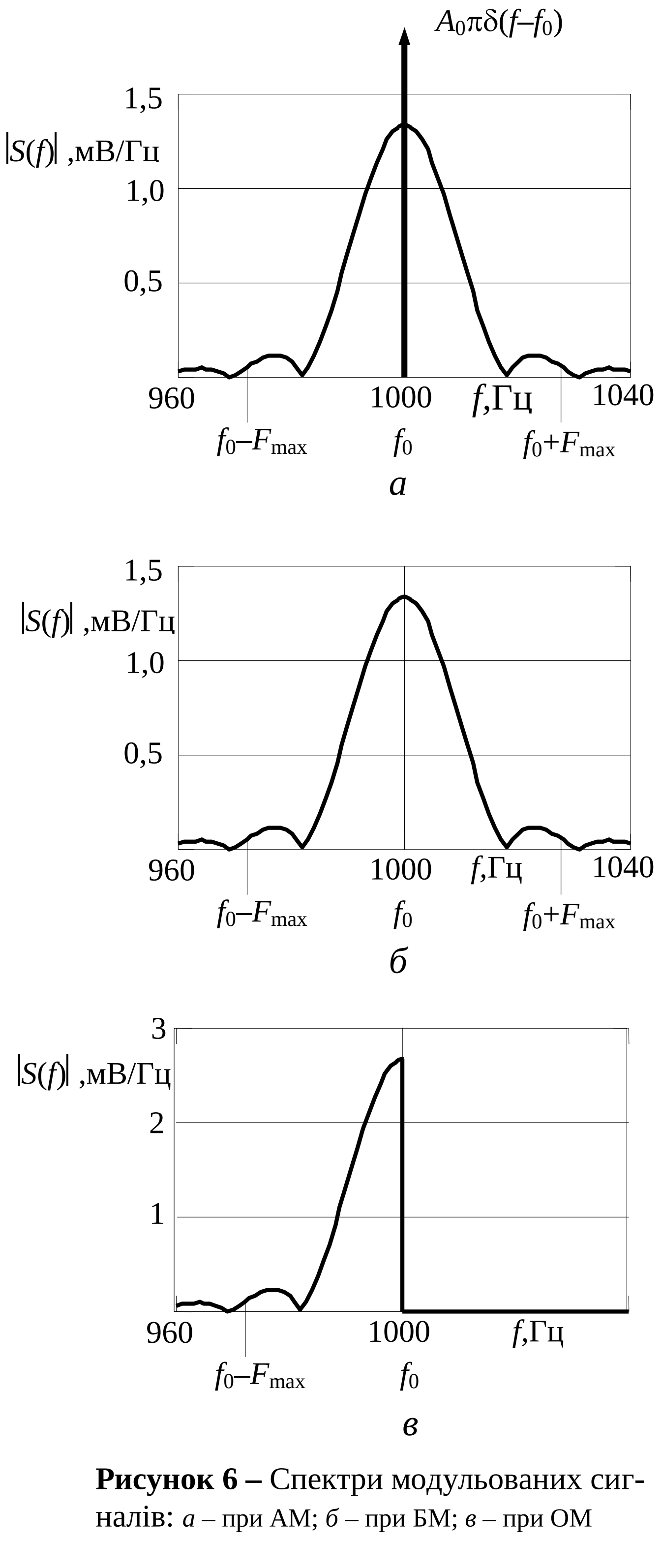


Рисунок 6 – Спектри модульованих сигналів: *а* – при АМ; *б* – при БМ; *в* – при ОМ

На рис. 6 показані спектри сигналів АМ, БМ і ОМ при модуляції сигналом, заданим у прикладі 1. Оскільки F_{max} = 27 Гц, частота несівного коливання вибрана рівною 1000 Гц, що значно перевищує значення F_{max}. Зображено спектр сигналу ОМ з нижньою бічною смугою частот, хоча можна зобразити спектр сигналу ОМ з верхньою бічною смугою частот. При побудові графіка слід використати значення амплітудного спектра модулюючого сигналу, отримані в задачі 1. На графіку слід показати ширину спектра сигналу (на рис. 6 вона не показана, щоб не захаращувати графіки). Коливання несівної частоти при АМ слід показати у вигляді δ-функції, оскільки графік зображує спектральну густину, а не спектр амплітуд.

Побудова графіка спектра модульованого сигналу та розрахунок ширини спектра сигналів ЧМ і ФМ можуть бути виконані на основі зазначеної вище літератури. Показовий приклад таких розрахунків наведено у [3, розд. 3.4; 4, розд. 3.4].

Рекомендується зобразити схеми модулятора й детектора заданого виду модуляції з використанням функціональних блоків (генератор, перемножувач, суматор тощо). Схеми повинні відповідати математичному опису відповідного модульованого сигналу чи перетворенням, які описують процес детектування.

ВКАЗІВКИ ДО РОЗВ’ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ 4

Задача 4 відноситься до розділу курсу “Сигнали цифрової модуляції”. Відомості про ці теми можна знайти в [3, розд. 3.5, 6.10; 4, розд. 3.5, 6.9; 5, розд. 12 – 14].

Для побудови схеми модулятора слід виходити з того, що сигнал цифрової модуляції – це послідовність елементарних радіоімпульсів $s_i(t)$, які проходять через проміжки часу – тактовий інтервал T. У разі двійкових АМ-2, ЧМ-2 чи ФМ-2 сигналів індекс i приймає значення 0 і 1 у відповідності до двійкового символу, який передається сигналом $s_i(t)$, а тактовий інтервал T дорівнює тривалості двійкового символу $T_б$ цифрового модулюючого сигналу.

У табл. 4 наведений опис елементарних сигналів для методів модуляції, заданих у цій задачі.

Таблиця 4 – Опис елементарних сигналів

i	Метод модуляції					
	АМ-2		ЧМ-2		ФМ-2	
	$s_i(t)$	a_i	$s_i(t)$	a_i	$s_i(t)$	a_i
1	$a{\cdot}A(t)\sin(2\pi f_0 t)$	a	$a{\cdot}A(t)\sin(2\pi(f_0+\Delta f/2)t)$	a	$a{\cdot}A(t)\sin(2\pi f_0 t)$	a
0	0	0	$a{\cdot}A(t)\sin(2\pi(f_0-\Delta f/2)t)$	a	$-a{\cdot}A(t)\sin(2\pi f_0 t)$	$-a$

У цій таблиці:

a_i – коефіцієнт, що визначає енергію i-го елементарного сигналу;

$A(t)$ – обвідна елементарних сигналів;

f_0 – частота несівного коливання;

Δf – рознесення частот при ЧМ-2.

Таким чином, елементарний сигнал – це відрізок гармонічного коливання з обвідною $aA(t)$. З метою визначення спектра елементарних сигналів їх слід розглядати як сигнал БМ – результат перемноження модулюючого сигналу $aA(t)$ на несівне коливання $\sin(2\pi f_0 t)$ (чи на $\sin(2\pi(f_0+\Delta f/2)t)$ або $\sin(2\pi(f_0-\Delta f/2)t)$ при ЧМ-2, що не змінює суті). Оскільки при БМ спектри модулюючого й модульованого сигналів жорстко пов’язані, а саме, дві бічні смуги частот сигналу БМ є точні копії модулюючого сигналу із симетрією відносно частоти несівного коливання, то необхідне обмеження спектра модульованого сигналу може бути досягнуто, як фільтрацією модулюючого сигналу відповідним ФНЧ, так і фільтрацією модульованого сигналу відповідним смуговим фільтром (СФ). Звідси випливає два можливих способи побудови схем модуляторів – з фільтрацією за допомогою ФНЧ та з фільтрацією за допомогою СФ.

Розглянемо формування сигналу $s_i(t)$ у разі **АМ-2 чи ФМ-2 та фільтрації за допомогою ФНЧ:**

1 Цифровий модулюючий сигнал поступає до входу кодеру маніпуляційного коду, кодер виробляє імпульс амплітуди a_i (рис. 7,*а*), яка відповідає табл. 4, і тривалості, що дорівнює тактовому інтервалу T.

2 Цей імпульс поступає до входу ФНЧ, який при дії імпульсу $b(t)$ амплітуди $a_i = 1$ виробляє імпульс $A(t)$, що показаний, як приклад, на рис 7,*б*. У загальному випадку відгук ФНЧ являє функцію $a_iA(t)$ (t_0 – затримка імпульсу в ФНЧ).

3 Сигнал $a_iA(t)$ подається до одного із входів перемножувача, на другий вхід якого подається гармонічне коливання $\sin(2\pi f_0 t)$. На виході перемножувача має місце сигнал $s_i(t)$.

На рис. 8 наведені амплітудні спектри імпульсів $b(t)$ і $A(t)$. Під час розрахунків рис. 7,*б* та 8,*б* коефіцієнт закруглення спектра α дорівнював 0,25.

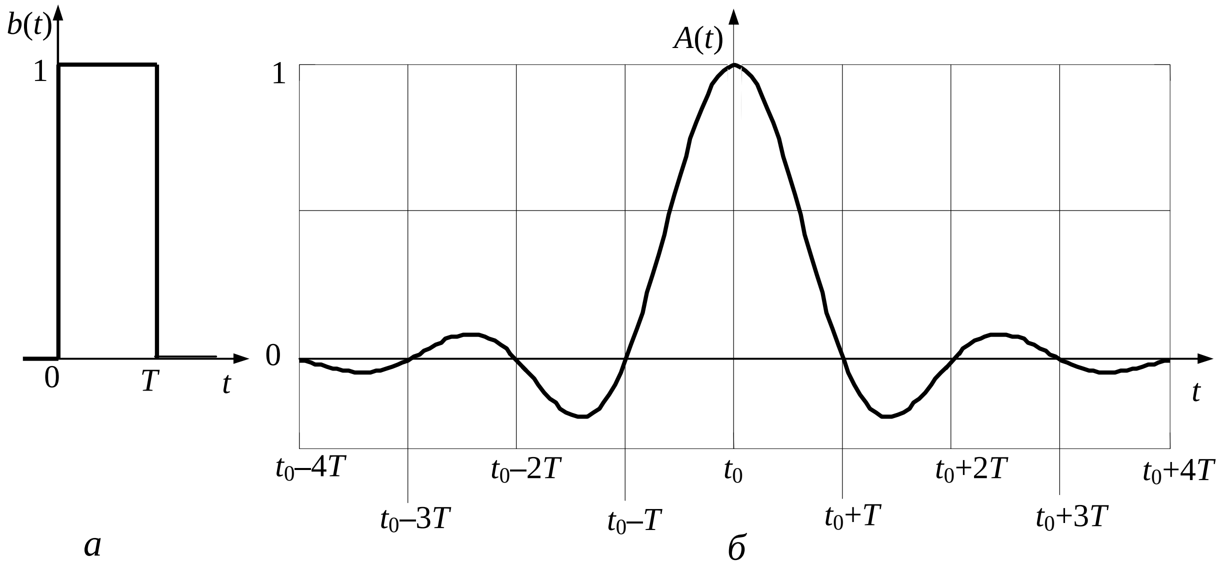


Рисунок 7 – Часові діаграми імпульсів:
а – на вході ФНЧ (a_i = 1); *б* – на виході ФНЧ

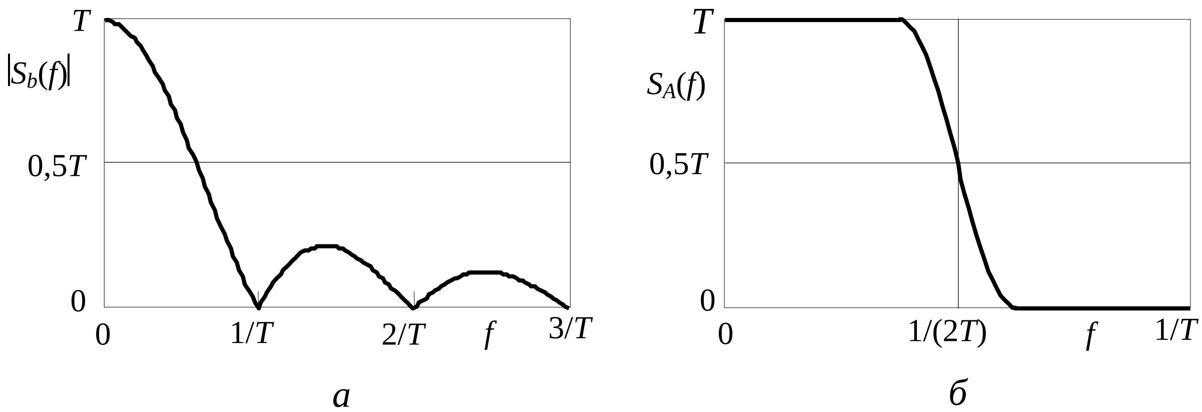


Рисунок 8 – Амплітудні спектри імпульсів:
а – на вході ФНЧ; *б* – на виході ФНЧ

Розглянемо формування сигналу $s_i(t)$ у разі **ЧМ-2 та фільтрації за допомогою ФНЧ.** На рис. 9 показані модулюючий сигнал $b(t)$ та відповідний сигнал ЧМ-2 $s(t)$. Сигнал $s(t)$ – послідовність елементарних сигналів $s_0(t)$ і $s_1(t)$ (з метою спрощення рисунку показані елементарні сигнали з П-подібною обвідною $A(t)$). Можна вважати, що сигнали $s_1(t)$ – елементи сигналу АМ-2, які розглянуто вище (у цьому разі $s_0(t) \equiv 0$), а сигнали $s_0(t)$ – елементи сигналу АМ-2, начебто модулюючим був цифровий сигнал, інверсний до показаного на рис. 9 (у цьому разі $s_1(t) \equiv 0$).

З наведених вище міркувань сигнал ЧМ-2 можна розглядати, як суму двох сигналів АМ-2. Звідси випливає спосіб побудови модулятора сигналу ЧМ-2:

1 Схема повинна бути двоканальною – один канал використовується для формування елементарних сигналів $s_1(t)$, а інший – для формування елементарних сигналів $s_0(t)$; виходи цих підканалів подаються до входів суматора, на виході якого має місце сигнал ЧМ-2.

2 Вхідний модулюючий цифровий сигнал поступає до входу маніпуляційного кодера, який має два виходи – на одному виході мають місце П-імпульси амплітуди a, коли на вході символ 1, а на другому виході мають місце П-імпульси амплітуди a, коли на вході символ 0.

3 Ці виходи подаються до входів двох ідентичних ФНЧ, які формують з кожного вхідного П-імпульсу імпульс $aA(t)$.

4 Виходи ФНЧ подаються до входів двох перемножувачів, на інші входи яких подаються від генераторів коливання $\sin(2\pi(f_0+\Delta f/2)t)$ та $\sin(2\pi(f_0-\Delta f/2)t)$.

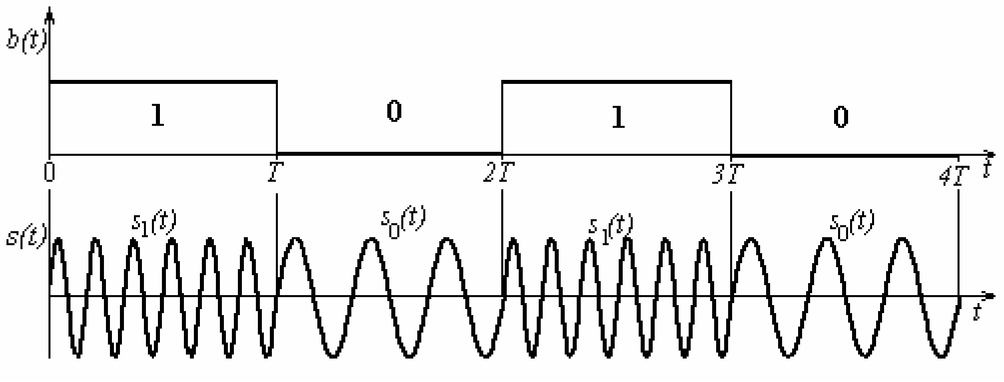


Рисунок 9 – Цифровий модулюючий сигнал $b(t)$ та відповідний йому сигнал ЧМ-2 $s(t)$

Описані схеми модуляторів сигналів АМ-2, ЧМ-2 та ФМ-2 при відповідних характеристиках ФНЧ можуть забезпечити передавання сигналів без міжсимвольної інтерференції. Для отримання сигналу ЧМ-2 може бути використана ще одна схема – з фільтрацією за допомогою ФНЧ: вхідний цифровий сигнал перетворюється у дворівневий, що приймає рівні a й $-a$. Цей сигнал подається до входу ФНЧ, а вихід ФНЧ – до входу модулятора аналогової частотної модуляції.

Розглянемо формування сигналів **АМ-2, ЧМ-2 та ФМ-2 у разі фільтрації за допомогою смугових фільтрів СФ.** Вище зазначено, що формування модульованих сигналів з обмеженим спектром може виконуватись з використанням СФ. У такому разі схема модулятора має дещо простіший вигляд – ключ (мультиплексор), після якого включено СФ. Ключ керується цифровим модулюючим сигналом $b(t)$:

- у разі АМ-2 цей ключ пропускає чи не пропускає коливання $\sin(2\pi f_0 t)$ – необхідно мати генератор такого коливання;

- у разі ФМ-2 цей ключ пропускає коливання $\sin(2\pi f_0 t)$ чи коливання $-\sin(2\pi f_0 t)$ – необхідно мати генератор коливання $\sin(2\pi f_0 t)$ та інвертор;

- у разі ЧМ-2 цей ключ пропускає коливання $\sin(2\pi(f_0+\Delta f/2)t)$ чи коливання $\sin(2\pi(f_0-\Delta f/2)t)$ – необхідно мати два генератори коливань. Такий сигнал не є повним еквівалентом сигналу, сформованого з використанням ФНЧ.

Мінімальна гранична частота смуги пропускання ФНЧ модуляторів сигналів різних видів цифрової модуляції визначається за умови: $f_{сп} = 1/(2T)$ (рис. 8,*б*).

Якщо **фільтрація виконується смуговим фільтром**, то його мінімальна смуга пропускання в разі АМ-2 та ФМ-2 визначається за умови: $F_{сп} = 1/T$.

Якщо в модуляторі сигналу ЧМ-2 фільтрація виконується смуговим фільтром, то його мінімальна смуга пропускання визначається: $F_{сп} = 1/T + \Delta f$, де Δf – рознесення частот. Вибір $\Delta f = 1/T$ забезпечує ортогональність елементарних сигналів $s_0(t)$ і $s_1(t)$. Ортогональність елементарних сигналів можна забезпечити і в разі $\Delta f = 1/(2T)$ за рахунок спеціального фазування коливань $\sin(2\pi(f_0+\Delta f/2)t)$ і $\sin(2\pi(f_0-\Delta f/2)t)$ (цей метод ЧМ-2 називається ММЗ – модуляція мінімального зсуву або MSK – Minimum Shift Keing), але модулятор суттєво складніший і його схема тут не розглядається.

Ширина спектра модульованого сигналу визначається формулами, наведеними вище для смуги пропускання смугового фільтра.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Гоноровский И. С.** Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1986.

2. **Баскаков С. И.** Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа,1988.

3. **Панфилов И.П., Дырда В.Е.** Теория электрической связи: Учебник для техникумов. – М.: Радио и связь, 1991.

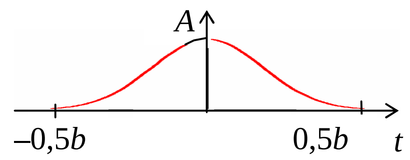
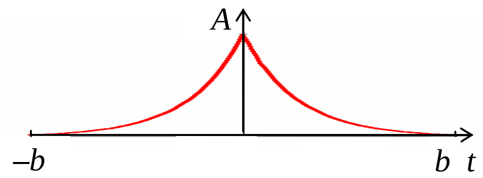
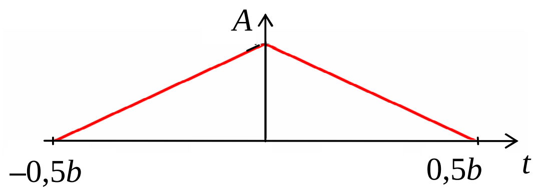
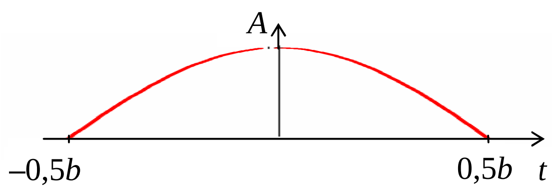
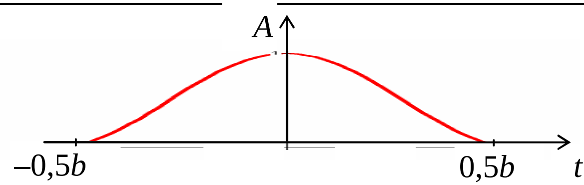
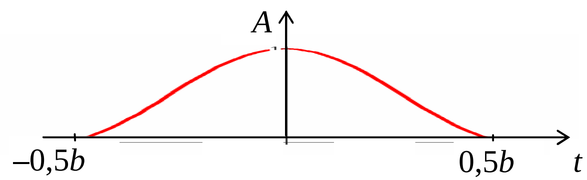
4. **Панфілов І. П., Дирда В. Ю., Капацін А. В.** Теорія електричного зв’язку: Підручник для вузів 1-го та 2-го рівнів акредитації. – К.: Техніка, 1998.

5. **Методы** формирования и преобразования сигналов в системах электросвязи: Методруководство по курсу ТЭС / Сост. Ю. Ф. Коробов– Одесса: ОЭИС, 1990.

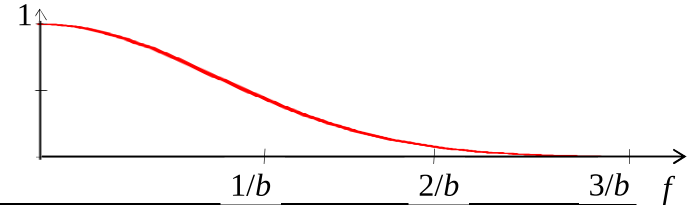
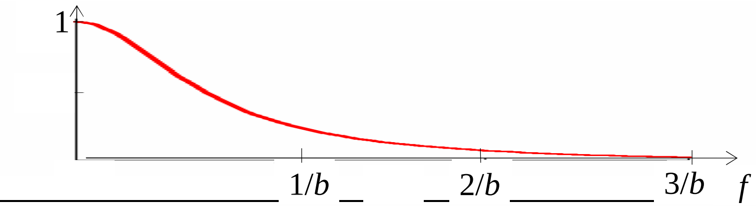
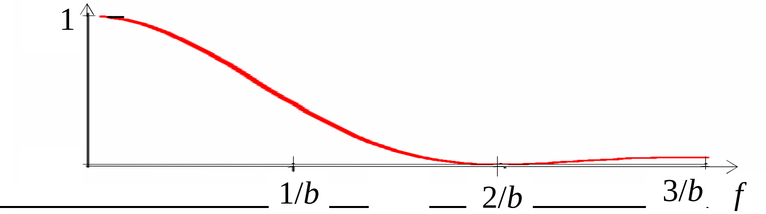
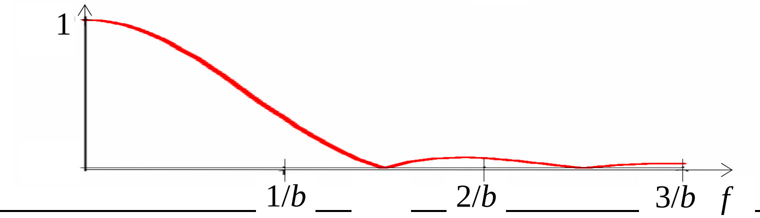
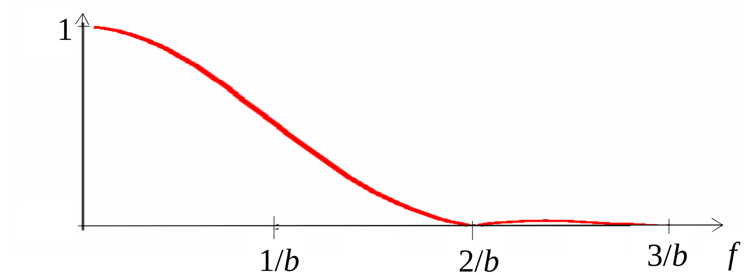
Додаток А – Таблиця вихідних даних для виконання КЗ

№ варіанту	Форма імпульсу	*A*, мВ	*b*, мс	*y*	Δ*s*, мВ	Вид аналогової модуляції	Девіація частоти, Гц	Девіація фази, рад	Вид цифрової модуляції
1	Гауссів	35	30	0,02	1,5	Амплітудна	–	–	ЧМ-2
2	Двосторон. експоненц.	70	40	0,06	3,5	Балансна	–	–	АМ-2
3	Трикутний	20	85	0,03	1,0	Односмугова	–	–	ЧМ-2
4	Косинусний	20	50	0,05	0,75	Частотна	200	–	ФМ-2
5	Косинус-квадрат	25	75	0,02	1,0	Фазова	–	3,5	АМ-2
6	Піднятий косинус	5	25	0,02	0,2	Амплітудна	–	–	ЧМ-2
7	Гауссів	50	15	0,02	2,5	Балансна	–	–	ФМ-2
8	Двосторон. експоненц.	100	20	0,06	5,0	Односмугова	–	–	ЧМ-2
9	Трикутний	80	65	0,03	4,0	Частотна	150	–	АМ-2
10	Косинусний	65	25	0,05	3,0	Фазова	–	5,0	ФМ-2
11	Косинус-квадрат	45	50	0,02	2,0	Амплітудна	–	–	ЧМ-2
12	Піднятий косинус	75	25	0,02	4,0	Балансна	–	–	АМ-2
13	Гауссів	10	30	0,02	0,5	Односмугова	–	–	ЧМ-2
14	Двосторон. експоненц.	55	45	0,06	2,5	Частотна	220	–	ФМ-2
15	Трикутний	10	5	0,03	0,5	Фазова	–	3,0	ЧМ-2
16	Косинусний	95	60	0,05	4,0	Амплітудна	–	–	АМ-2
17	Косинус-квадрат	20	65	0,02	0,8	Балансна	–	–	ФМ-2
18	Піднятий косинус	65	70	0,02	3,0	Односмугова	–	–	ЧМ-2
19	Гауссів	5	2	0,02	0.25	Частотна	5000	–	АМ-2
20	Двосторон. експоненц.	5	45	0,06	0,2	Фазова	–	4,5	ФМ-2
21	Трикутний	35	25	0,03	1,5	Амплітудна	–	–	ЧМ-2
22	Косинусний	60	50	0,05	3,0	Балансна	–	–	АМ-2
23	Косинус-квадрат	35	15	0,02	1,75	Односмугова	–	–	ЧМ-2
24	Піднятий косинус	20	80	0,02	0,8	Частотна	120	–	ФМ-2
25	Гауссів	75	10	0,02	3,5	Фазова	–	4,0	АМ-2
26	Двосторон. експоненц.	95	60	0,06	4,5	Амплітудна	–	–	ЧМ-2
27	Трикутний	10	80	0,03	0,5	Балансна	–	–	ФМ-2
28	Косинусний	100	40	0,05	5,0	Односмугова	–	–	ЧМ-2
29	Косинус-квадрат	40	2	0,02	2,0	Частотна	3500	–	АМ-2
30	Піднятий косинус	80	70	0,02	4,0	Фазова	–	3,7	ФМ-2

Додаток Б – Задані для виконання КЗ сигнали

Опис імпульсу		Вигляд графіка $s(t)$
Гауссів імпульс	$s(t) = A\exp(-(4t/b)^2), \quad -\infty < t < \infty$	
Двосторонній експоненційний імпульс	$s(t) = A\exp(-4\|t\|/b), \quad -\infty < t < \infty$	
Трикутний імпульс	$s(t) = \begin{cases} A(1-2\|t\|/b), & \|t\| \le b/2, \\ 0, & \|t\| > b/2 \end{cases}$	
Косинус-імпульс	$s(t) = \begin{cases} A\cos(\pi t/b), & \|t\| \le b/2, \\ 0, & \|t\| > b/2 \end{cases}$	
Косинус-квадрат імпульс	$s(t) = \begin{cases} A\cos^2(\pi t/b), & \|t\| \le b/2, \\ 0, & \|t\| > b/2 \end{cases}$	
Піднятий косинус-імпульс	$s(t) = \begin{cases} 0,5A(1+\cos(2\pi t/b)), & \|t\| \le b/2, \\ 0, & \|t\| > b/2 \end{cases}$	

Додаток В – Спектральна густина заданих для виконання КЗ сигналів

Форма імпульсу	Спектральна густина	Вигляд графіка $\lvert S(f)\rvert$ / $S(0)$
Гауссів імпульс	$S(f)=0{,}25\sqrt{\pi}\,Ab\exp\left(-\left(\frac{\pi b f}{4}\right)^2\right)$	
Двосторонній експоне-нційний імпульс	$S(f)=\frac{2Ab}{4+(\pi b f)^2}$	
Трикутний імпульс	$S(f)=\frac{Ab}{2}\left(\frac{\sin(\pi b f/2)}{\pi b f/2}\right)^2$	
Косинус-імпульс	$S(f)=\frac{2Ab}{\pi}\cdot\frac{\cos(\pi bf)}{1-(2bf)^2}$	
Косинус-квадрат та піднятий косинус-імпульси	$S(f)=\frac{Ab}{2(1-(bf)^2)}\cdot\frac{\sin(\pi bf)}{\pi bf}$	

Додаток Г – Математичні співвідношення для виконання КЗ

$$\int_0^\infty \exp(-a^2x^2)\cos(bx)dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2a}\exp(-b^2/4a^2) \quad \text{при} > 0$$

$$\int \exp(ax)\cos(bx)dx = \frac{\exp(ax)}{a^2+b^2}(a\cos(bx)+b\sin(bx))$$

$$\int x\cos(ax)dx = \frac{\cos(ax)}{a^2} + \frac{x\sin(ax)}{a}$$

$$\int x^2\cos(ax)dx = \frac{2x}{a^2}\cos(ax) + \left(\frac{x^2}{a} - \frac{2}{a^3}\right)\sin(ax)$$

$$\int \cos(ax)dx = \frac{\sin(ax)}{a}$$

$\sin(\pi \pm x) = \mp \sin x$

$\sin(\pi/2 + x) = \cos x$

$$\cos\alpha \cdot \cos\beta = \frac{1}{2}\left[\cos(\alpha-\beta) + \cos(\alpha+\beta)\right]$$

$$1 - \cos\alpha = 2\sin^2(\alpha/2)$$

$$1 + \cos\alpha = 2\cos^2(\alpha/2)$$

Додаток Д – Основні правила оформлення КЗ

1 Виконане комплексне завдання повинне містити:
- титульний аркуш (див. Додаток Е);
- вихідні дані до комплексного завдання;
- чистий аркуш для рецензії керівника;
- зміст;
- основну частину;
- висновки;
- перелік посилань.

2 Текст виконується на одній стороні аркушів (можна і з двох сторін) білого паперу формату А4 (297х210 мм), рукописним способом (чорнилом чи пастою темного кольору) або на ПЕОМ у редакторі Word, шрифт Times New Roman Cyr, розмір 14, міжрядковий інтервал одинарний. На аркушах залишають поля: ліве, верхнє та нижнє не менше 20 мм, праве не менше 10 мм.

3 Сторінки виконаного завдання нумерують арабськими цифрами. Номер сторінки проставляють у правому верхньому куті аркуша.

4 Текст виконаного завдання ділять на розділи у відповідності до завдання (розділ – розв’язання однієї задачі). Розділ повинен мати порядковий номер арабськими цифрами та назву.

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

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

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

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

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

10 Виконане завдання повинне бути зброшурованим з використанням скоб, швидкозшивачів тощо.

Додаток Е – Зразок титульного аркуша КЗ

ДЕРЖАВНИЙ КОМІТЕТ ЗВ’ЯЗКУ та ІНФОРМАТИЗАЦІЇ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ЗВ’ЯЗКУ ім. О. С. ПОПОВА

Кафедра теорії електричного зв’язку

КОМПЛЕКСНЕ ЗАВДАННЯ

з курсу . . . . на тему:

ОПИС СИГНАЛІВ ЕЛЕКТРОЗВ’ЯЗКУ та РОЗРАХУНКИ ЇХ ХАРАКТЕРИСТИК

Виконав(ла) студент(ка) 2-го курсу факультету . . . .

групи . . . .

(Прізвище та ініціали)

Керівник . . . .

(Прізвище та ініціали)

Комплексне завдання перевірене і допущене до захисту

Керівник . . . .

(підпис)

“ . . . . ”. . . . . 200... р.

Оцінка комплексного завдання після захисту. . . . .

. . . .

(підпис)

“ . . . . ”. . . . . 200... р.

Одеса 200...