

1.1. Вступ

Теорія передачі сигналів - це наука про передачу інформації на відстань.

Курс теорії передачі сигналів являє собою єдину наукову дисципліну, основу якої складають теорія сигналів, теорія завадостійкості і теорія інформації.

У курсі вивчаються загальні закономірності передачі інформації з каналів зв'язку, визначаються потенційні можливості різних способів передачі та прийому сигналів порівнюються різні системи зв'язку між собою і визначаються алгоритми роботи окремих елементів зв'язку.

Задача теорії визначити, як повинний працювати той або інший елемент системи зв'язку і які вимоги він повинний задовольняти. Питання ж про те, як розрахувати і побудувати ці елементи, вивчаються на спеціальних інженерних курсах.

Початок загальної теорії передачі повідомлень був закладений у роботі В. А. Котельникова "Про пропускну здатність ефіру і дроту" (1933 р.) у якій була сформульована і доведена теорема відліків і в роботі Р. Хартлі (1928 р.) "Передача інформації", у якій була введена логарифмічна міра інформації. Наступним великим кроком у розвитку теорії з'явилися роботи В. А. Котельникова з теорії потенційної завадостійкості (1946 р.) і К. Шеннона з теорії інформації (1948 р.). У цих роботах були сформульовані основні положення і теореми сучасної теорії передачі повідомлень.

У нашій країні розвитку теорії і впровадженню її в практику надається велике значення. Про високий рівень радянської науки і техніки свідчать такі досягнення, як створення надскладних систем керування космічними кораблями і ракетами, систем далекого і наддалекого космічного зв'язку, систем зв'язку і телебачення з використанням штучних супутників Землі. У цих системах застосовуються найбільш удосконалені способи передачі, оптимальні методи обробки сигналів і завадостійкі коди, що дозволяють виявляти і виправляти помилки, що виникають у каналі.

1.2. Функціональна схема системи зв'язку

Будь-яка система зв'язку є система передачі. Об'єктом передачі є повідомлення. Повідомлення містить у собі інформацію, яку необхідно передати від відправника (джерела повідомлень) до одержувача інформації.

Об'єкт, властивості якого відображаються іншим об'єктом, називається джерелом.

Сукупність відображуваних у даний момент часу властивостей джерела, утворюють повідомлення.

Загальний вид функціональної схеми системи зв'язку зображений на рис.1.1, а на рис.1.2 - функціональна схема системи передачі дискретних повідомлень. Повідомлення передаються по каналу зв'язку за допомогою сигналів. У системі електричного зв'язку сигнал представляє собою деяке електричне коливання, що відображає передане повідомлення.

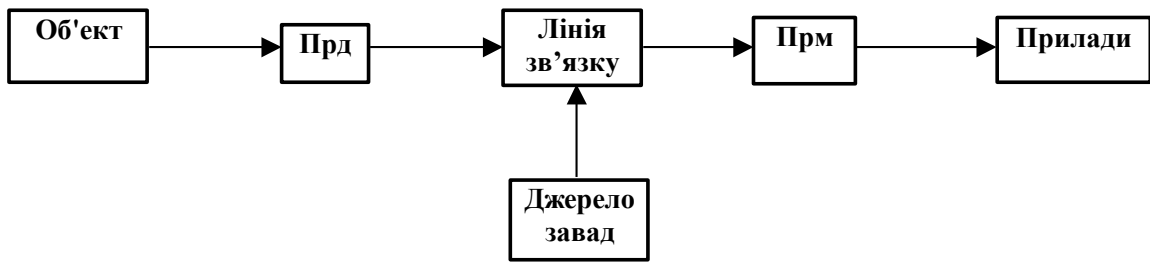


Рис.1.4. Система телеметрії

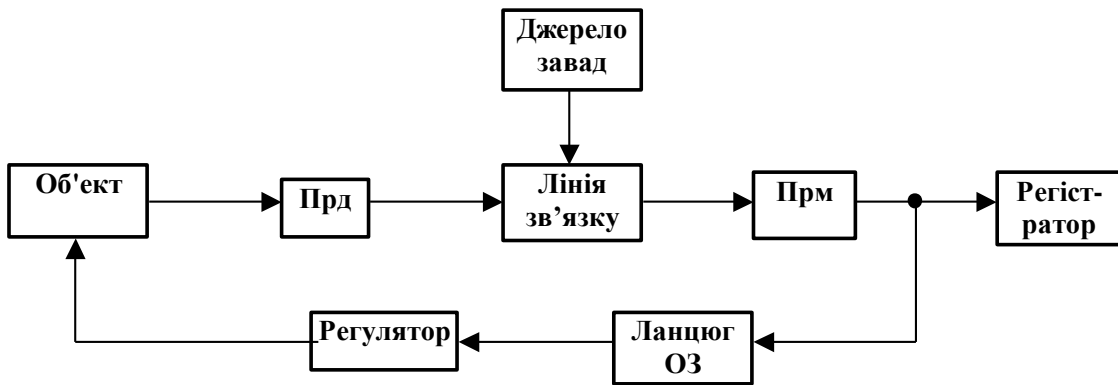


Рис. 1.5. Система телекерування

У цій системі фізична величина, що підлягає вимірові (температура, тиск, швидкість і т.п.), за допомогою датчиків впливає на передавач, де вона перетворюється в сигнал, і передається по каналу. На прийомному кінці передана фізична величина або її зміни виділяються із сигналу і спостерігаються або реєструються за допомогою приладів.

У системі телекерування передбачене виконання певних дій відповідно до вимірюваної величини. Для цієї мети є регулюючі пристрої і ланцюг зворотного зв'язку (ЛОС).

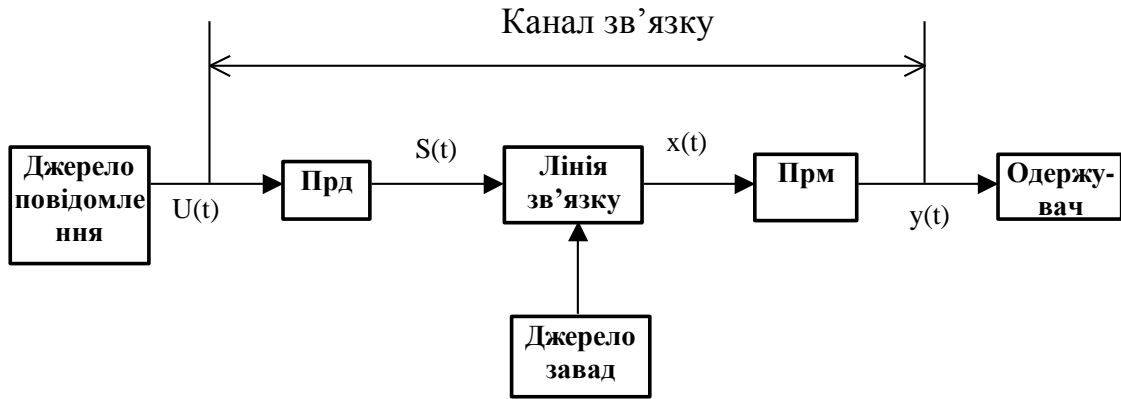


Рис.1.1. Функціональна схема системи зв'язку

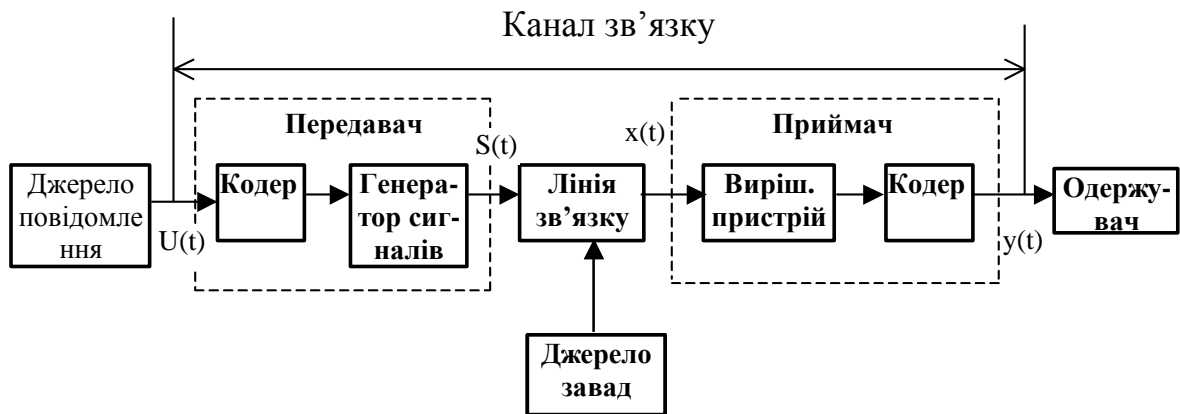


Рис.1.2. Функціональна схема системи передачі дискретних повідомлень

Фізична величина, що змінюється, яка відображає передане повідомлення називається сигналом.

Принципова відмінність сигналу від повідомлення полягає в тому, що сигнал є часовий процес поширення символів в просторі, а повідомлення – статична просторова комбінація символів.

Повідомлення і відповідні їм сигнали бувають дискретними і безперервними. Дискретне повідомлення являє собою послідовність окремих елементів. Фізична природа цих елементів може бути будь яка. Сигнал у цьому випадку також являє собою дискретну послідовність окремих елементів, що відповідають елементам переданого повідомлення.

З дискретними сигналами ми зустрічаємося в цифровій техніці, у телеграфії. Так, при передачі звичайної телеграми, повідомленням є текст телеграми, елементами повідомлення – букви, сигналами – кодові комбінації, що відповідають цим буквам.

Безперервне повідомлення - це деяка фізична величина (звуковий тиск, температура і т.п.) приймаюча будь-які значення в заданому інтервалі. Повідомлення U за допомогою датчиків перетворюється в безупинно змінюючу величину $U(t)$ - відеосигнал (Рис.1.3).

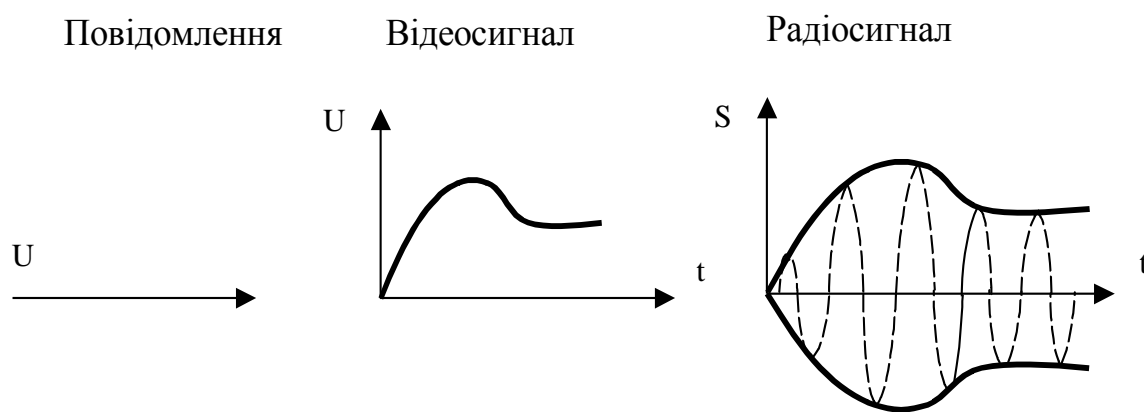


Рис.1.3. Повідомлення, відеосигнал, радіосигнал

При передачі мови таке перетворення виконує мікрофон, а при передачі зображення – електронно-променева трубка. У більшості випадків відеосигнал є низькочастотним коливанням, що відображає передане повідомлення. Для зручності аналізу відеосигнал часто умовно розглядають як повідомлення, яке необхідно передавати по каналу зв'язку.

У деяких випадках відеосигнал безпосередньо передається по лінії. Так роблять, наприклад, при звичайному міському телефонному зв'язку. Для передачі на великі відстані (по кабелю і радіо) відеосигнал перетворюється у високочастотний сигнал (радіосигнал).

Таким чином, повідомлення $U(t)$, що надходить від джерела у передавачі, обробляється певним чином і формується сигнал $S(t)$, зручний для передачі по лінії зв'язку. У телефонії, наприклад, ця операція зводиться просто до перетворення звукового тиску в пропорційно змінюючий електричний струм мікрофона. У телеграфії здійснюється кодування, в результаті якого послідовність елементів повідомлення (букв, цифр) перетворюється в послідовність кодових символів (0, 1).

Лінією зв'язку називають середовище, використовуване для передачі від передавача до приймача.

У системі проводового зв'язку таким середовищем є фізичний ланцюг (пари, проводів, кабель), у системах радіозв'язку – область простору, у якому електромагнітні хвилі поширюються від передавача до приймача.

На вхід приймача надходять сигнали $x(t) = f(S, W)$, пошкоджені завадами $W(t)$. Приймач обробляє прийняті сигнали $x(t)$ за визначеними правилами і відновлює по них передане повідомлення $U(t)$.

Каналом зв'язку називається сукупність технічних засобів, що служать для передачі повідомлень від джерела до одержувача. Цими засобами є передавач, приймач і лінія зв'язку.

Розрізняють наступні системи зв'язку:

- дискретні (системи телеграфного зв'язку, передачі даних і т.п.);

- безперервні (радіомовлення, телефонія і т.п.)
- змішані (системи ІКМ, коли безперервне повідомлення передається дискретними сигналами);
- багатоканальні, що забезпечують взаємно незалежну передачу декількох повідомлень по одному каналу зв'язку.

Система зв'язку може служити не тільки для передачі інформації від людини до людини, але і для передачі результатів виміру параметрів якого-небудь процесу або впливів, призначених для керування об'єктом. До таких систем відносяться, наприклад, система телевимірювання (рис.1.4) (телеметрії) та система телекерування (рис.1.5). Система телевимірювання подібна системі зв'язку.

1.3. Сигнали і їх загальні характеристики

Описом конкретного сигналу може бути деяка функція часу $S(t)$. Визначивши так чи інакше цю функцію ми визначаємо і сигнал. Однак такий повний опис сигналу потрібно не завжди. Для рішення ряду питань досить більш загального опису у виді декількох узагальнених, параметрів, що характеризують основні властивості сигналу, подібно тому, як це робиться в системах транспортування. Указуючи габарити і вагу, ми характеризуємо основні властивості предмету з погляду умов його транспортування; інші властивості предмету (наприклад, колір, запах і т.п.) з цього погляду є несуттєвими.

Сигнал є також об'єкт транспортування, а техніка зв'язку, власне кажучи, техніка транспортування (передачі) сигналів по каналі зв'язку. Тому доцільно визначити параметри сигналу, що є основними, з погляду його передачі. Такими параметрами є тривалість сигналу, його динамічний діапазон і ширина спектра.

Усякий сигнал, розглянутий як часовий процес, має початок і кінець. Тому тривалість сигналу T є природним його параметром, що визначається інтервал часу, у межах якого сигнал існує.

Характеристиками сигналу, усередині інтервалу його існування, є динамічний діапазон і швидкість зміни сигналу.

Динамічний діапазон визначається як відношення найбільшої миттєвої потужності сигналу до найменшої. Динамічний діапазон мови диктора, наприклад, дорівнює 25-30 дБ., невеликого вокального ансамблю 45-55 дБ., симфонічного оркестру 65-75 дБ.

У реальних системах завжди мають місце завади. Для задовільної передачі потрібно, щоб найменша потужність сигналу перевищувала потужність завад. Відношення сигналу до завади характеризує відносний рівень сигналу. Звичайно визначається логарифм цього відношення, що називається перевищенням сигналу над завадою.

$$D_c = \frac{P_{\max}}{P_{\min}} \text{ или } D_c = 10 \lg \frac{P_{\max}}{P_{\min}}$$

Це перевищення і приймається як другий параметр сигналу.

Третім параметром є ширина спектра сигналу F_c . Ця величина дає представлення про швидкість зміни сигналу усередині інтервалу його існування.

У техніці у зв'язку спектр сигналу часто свідомо обмежується. Це обумовлено тим, що апаратура і лінія зв'язку має обмежену смугу частот. Обмеження спектра здійснюється виходячи з припустимих перекручень сигналу. Наприклад, при телефонному зв'язку потрібно виконати дві умови, щоб мова була розбірлива і кореспонденти могли впізнати один одного по голосу. Для виконання цих умов спектр мовного сигналу можна обмежити смугою 300 - 3400 Гц.

Передача більш широкого спектра мови в цьому випадку недоцільно, тому що це веде до технічних ускладнень і збільшення витрат. Ширина спектра телеграфного сигналу залежить від швидкості передачі і звичайно приймається рівною $F \approx 1,5V$, де (V - швидкість телеграфування в бодах, що визначає кількість переданих телеграфних посилок за одиницю часу. Так при телетайпній передачі $V = 50$ Бод і $F = 75$ Гц.

Обсягом сигналу називають добуток трьох основних параметрів сигналу

$$V_c = T_c D_c F_c$$

Для того, щоб сигнал із заданим обсягом V_c передати по каналу зв'язку необхідно, щоб виконувалася умова (рис. 1.6).

$$V_c \geq V_k$$

Де $V_{kc} = T_k D_k F_k$

T_k - час, протягом якого по каналу ведеться передача,

D_k - динамічний діапазон каналу,

F_k - смуга частот пропускання каналу.

При цьому

$$T_k \geq T_c, D_k \geq D_c, F_k \geq F_c.$$

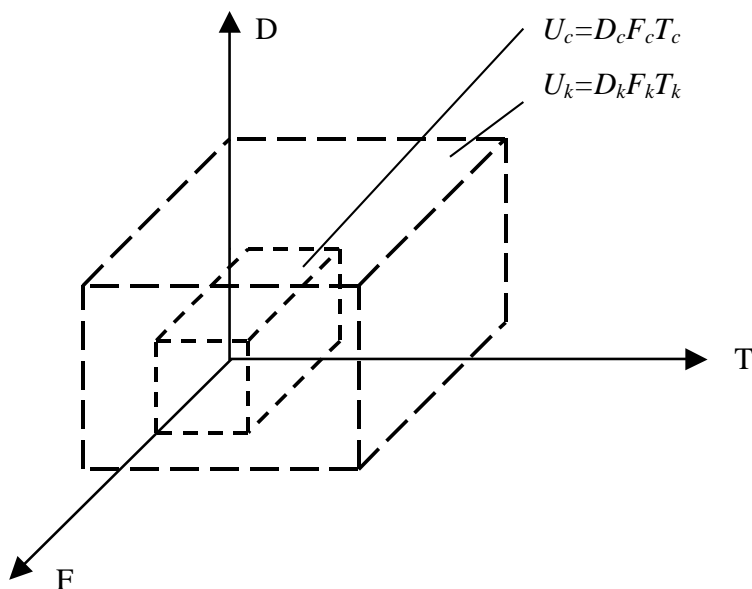


Рис.1.6. Геометричне представлення об'ємів сигналу та каналу

1.4. Види сигналів

Розрізняють наступні види сигналів:

- прості,
- складні,
- еталонні або спробні,
- детерміновані,
- випадкові,
- періодичні,
- неперіодичні.

Простим сигналів називають сигнал, що відповідає одній елементарній послі. Наприклад, при передачі дискретної інформації простому сигналу відповідає сигнал кодового символу в комбінації (рис.1.7, а)

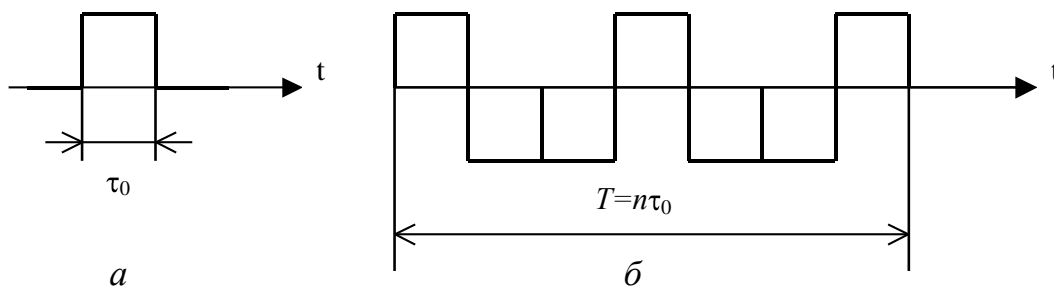


Рис.1.7. Простий та складний сигнал
a - простий, *б* - складний

Сигнал, що представляє собою сукупність елементарних послілок, називається складеним або складним (рис.1.7.б).

У теорію зв'язку вводиться поняття бази сигналу ν

$$\nu = 2TF$$

де T - тривалість сигналу,

F - смуга частот, займана сигналом.

Для простих сигналів $\nu \approx 1$, а для складних $\nu \gg 1$. З погляду на цю обставину, прості сигнали називаються вузькополосові, а складні – широкополосові.

Еталонні або спробні сигнали (рис.1.8):

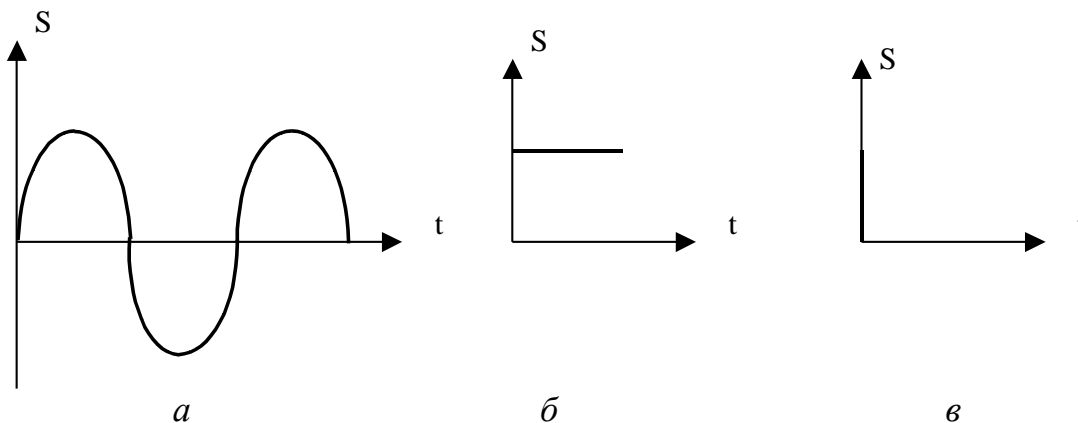


Рис.1.8. Еталонні сигнали: *a* – гармонічний, *б* – одинична функція, *в* – дельта-функція

1. Гармонічний сигнал

$$S(t) = A \cos(\omega t + \varphi), \quad (-\infty < t < \infty),$$

де A , ω , φ - амплітуда, частота, фаза сигналу відповідно.

2. Одинична функція, (функція включення)

$$1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0 \\ 1 & \text{при } t > 0 \end{cases}$$

3. Одиничний імпульс (дельта-функція).

$$\delta(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0 \\ \infty & \text{при } t = 0 \\ 0 & \text{при } t > 0 \end{cases}$$

Сигнал, описаний певною функцією часу називається детермінованим або регулярним,

$$S(t) = at, S(t) = at^2, S(t) = A\cos(\omega t + \varphi).$$

Випадковим сигналом називається такий сигнал, математичним описом якого є випадкова функція часу.

До основних типів детермінованих сигналів відносяться:

- періодичні
- майже періодичні,
- неперіодичні.

1.5. Періодичні сигнали

Періодичним сигналом називається сигнал, що повторюється через певні проміжки часу

$$S(t) = S(t+n)$$

де T – період повторення,

n - будь-яке ціле число.

Будь-яка періодична функція, що задовольняє умовам Діріхле* може бути представлена у виді ряду Фур'є

$$S(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(k\omega_1 t - \varphi_k)$$

або

$$S(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\omega_1 t + b_k \sin k\omega_1 t),$$

де

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} S(t) \cos k\omega_1 t dt, \quad b_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} S(t) \sin k\omega_1 t dt,$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} S(t) dt, \quad a_k = A_k \cos \varphi_k, \quad b_k = A_k \sin \varphi_k, \quad A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$$

$$\varphi_k = \arctg b_k / a_k$$

Комплексна форма запису ряду Фур'є

$$S(t) = \frac{1}{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \dot{A}_k e^{jk\omega_1 t},$$

де

$$\dot{A}_k = A_k e^{-j\varphi_k} = a_k + jb_k, A_k = |\dot{A}_k|,$$

$$\dot{A}_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} S(t) e^{-jk\omega_1 t} dt$$

Якщо $S(t)=-S(-t)$ (функція парна), то $b_k=0, A_k=a_k$.

Якщо $S(t)=S(-t)$ (функція непарна), то $a_k=0, A_k=b_k$.

Спектр періодичного сигналу зображається графічно у виді спектральних ліній, довжина яких пропорційна амплітудам (фазам) відповідних частотних складових. Спектр періодичного сигналу - дискретний (лінійчатий). При цьому відстань між сусідніми лініями постійна і дорівнює частоті першої гармоніки (рис.1.9).

Безперервна крива, що з'єднує кінці ліній спектра, називається обвідною спектра.

$$S(j\omega) = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} S(t) e^{-j\omega t} dt = S(\omega) e^{j\varphi(\omega)},$$

де $S(\omega), \varphi(\omega)$ - обвідна спектрів амплітуд і фаз відповідно.

* Умова Діріхле: функція $S(t)$ повинна бути усюди однозначною, кінцевою, кусочно-безперечною (тобто інтервал на якому функція визначена, може бути розбитий на кінцеве число інтервалів, у кожному з яких функція $S(t)$ безперервна і монотонна), повинна мати обмежене число максимумів і мінімумів, у будь-якій точці розриву існує $S(t-0)$ і $S(t+0)$, значення $S(t)$ у точці розриву дорівнює $\frac{S(-0) + S(+0)}{2}$.

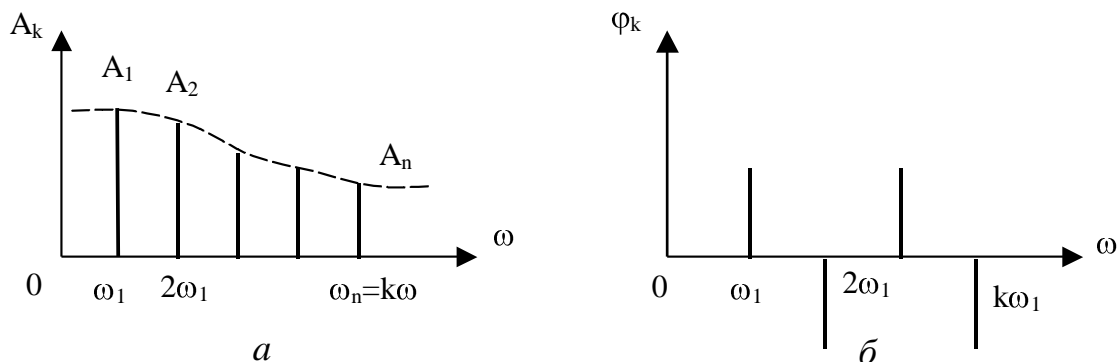


Рис.1.9. Спектр амплітуд (а) и фаз (б) неперіодичного сигналу

Середня потужність сигналу, яка виділяється при навантаженні опором в 1 Ом, дорівнює

$$P_{cp} = \overline{S^2(t)} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} S(t) dt = \frac{a_0^2}{2} + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} A_k^2$$

Отримана формула для P_{cp} називається рівністю Парсеваля, відповідно до якої середня потужність періодичного сигналу дорівнює сумі середніх потужностей усіх частотних складових його спектра. Реальні канали зв'язку, через які проходить сигнал, мають обмежену смугу пропускання, тому сигнал можна представити у виді

$$S(t) \approx \sum_{k=l_1}^{l_2} (a_k \cos k\omega_1 t + b_k \sin k\omega_1 t) \quad (1.1)$$

Число членів ряду (I) дорівнює n , де $n = 2TF, F = (e_{2-i1})/T$ смуга частот займана сигналом.

Апроксимація сигналу $S(t)$ поруч (1.1) дає найменше середньоквадратичне відхилення від точного значення $S(t)$, якщо Q_k і ϕ_k є коефіцієнтами ряду Фур'є.

1.6. Майже періодичні і квазіперіодичні сигнали.

Сума гармонічних сигналів з некрратними частотами називається квазіперіодичним сигналом.

Одне з основних властивостей квазіперіодичного сигналу - можливість визначення наближеного періоду. Спектр такого сигналу - лінійчатий.

1.7. Неперіодичні сигнали

Неперіодичним, називають сигнал, що задовольняє умові $S(t) \neq S(t+n)$ на інтервалі $-\infty < t < \infty$.

Такий сигнал представляється функцією на кінцевому або напів нескінченному інтервалах:

$$t_1 < t < t_2, \quad t_1 < t < \infty$$

Для неперіодичного сигналу існують пряме і зворотне перетворення Фур'є

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t) e^{-j\omega t} dt$$

$$S(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(j\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

Величина $S(j\omega)$ виражає спектральну щільність сигналу і називається спектральною характеристикою або комплексним спектром, а модуль $S(j\omega)$ спектром сигналу.

$$S(j\omega) = \pi \frac{dA}{d\omega}; \quad |s(j\omega)| = S(\omega) \text{ спектр сигналу.}$$

Спектральну характеристику, як комплексну величину, можна представити у виді

$$S(j\omega) = A(\omega) + jB(\omega) = S(\omega) e^{-j\varphi(\omega)}$$

$$A(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \cos \omega t dt, \quad B(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \sin \omega t dt,$$

де

$$S(\omega) = \sqrt{A^2(\omega) + B^2(\omega)}, \quad \varphi(\omega) = \arctg \frac{B(\omega)}{A(\omega)}$$

Енергія неперіодичного сигналу дорівнює

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} S^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(j\omega) S(-j\omega) dt = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |S(\omega)|^2 d\omega.$$

Якщо спектр обмежений смугою частот $F=f_2-f_1$ то можна наближено записати

$$\frac{1}{\pi} \int_{f_1}^{f_2} |S(\omega)|^2 d\omega \approx \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |S(\omega)|^2 d\omega. \quad (1.2)$$

Практично ширину спектра сигналу необхідно вибирати так, щоб забезпечити виконання цієї рівності з заданою точністю. Це однак не є єдиним критерієм вибору ширини спектра, другим критерієм є припустима ступінь перекручування форм сигналу.

Практично під шириною спектра розуміється область частот, у межах якої зосереджене 90% або 99% енергії сигналу.

На рис.1.10 приведені спектри деяких неперіодичних сигналів.

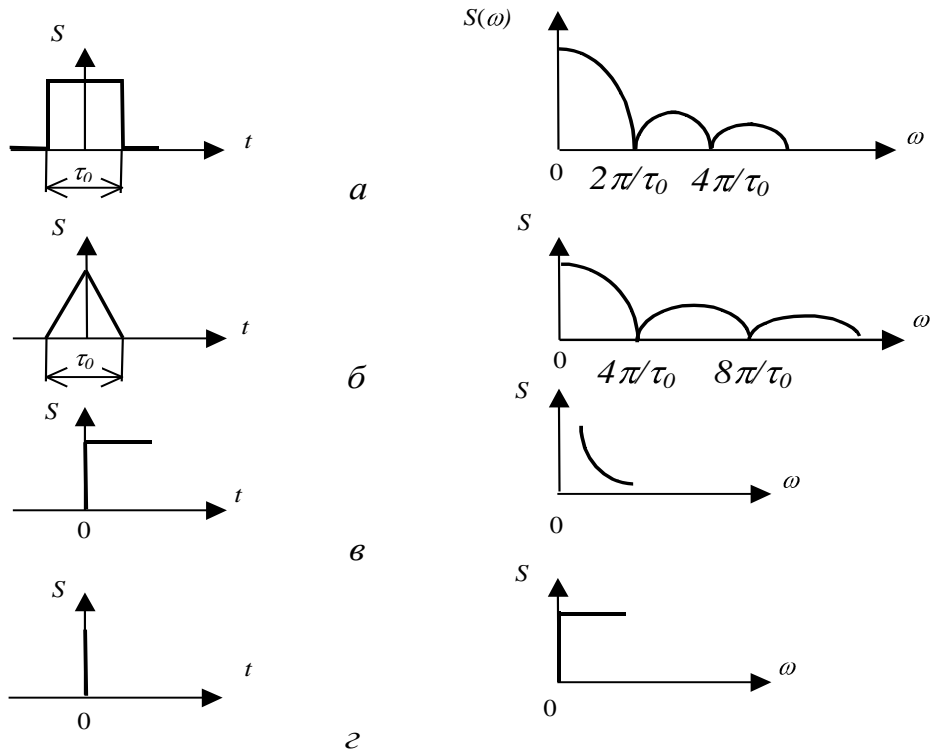


Рис.1.10. Спектри декількох неперіодичних функцій.

Добуток ширини спектра імпульсного сигналу і тривалості імпульсу є величина постійна

$$F\tau = const$$

$F\tau = 1$ - для прямокутного імпульсу,

$F\tau = 1,5$ - для косинусоїдального імпульсу,

$F\tau = 2$ - для трикутного імпульсу.