

**ПЕРЕТВОРЕННЯ ТА ОЦИФРОВУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ**

*В статті розглядаються сигнали, їх перетворення та оцифровування. У процесі передавання інформації використовуються операції перетворення неперервного сигналу на імпульсний і навпаки. Для перетворення аналогового сигналу на імпульсний необхідно здійснити дискретизацію (квантування) за часом. Точність відтворення сигналу з імпульсної послідовності тим вища, чим вища частота дискретизації щодо верхньої частини спектра інформаційного сигналу.*

**Ключові слова:** сигнал, електронний пристрій, модуляція, імпульси, оцифрування.

**Постановка проблеми.** Основною рушійною силою розвитку радіоелектроніки та телекомунікаційної галузі стали досягнення в мікроелектроніці, що, в свою чергу, дозволило реалізувати прогресивні методи транспортування, розподілу, обробки та зберігання інформації. Хоча первинна інформація використовується у більшості випадків в аналоговому вигляді, але цифровий сигнал має переваги внаслідок його високої завадостійкості і можливості використовувати регенератори при передачі на великі відстані. Тому мікроелектронні системи, які використовують цифрові методи обробки інформації, містять пристрої взаємного перетворення аналогових та цифрових сигналів. Роль таких пристроїв виконують аналого-цифрові і цифро-аналогові перетворювачі (АЦП і ЦАП) [4].

Оскільки теорія та дослідження процесів аналого-цифрового перетворення ускладнюється необхідністю отримання інформації за короткий час, що вимагає використання сучасних високоефективних способів щодо їх поширення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Цифрова обробка сигналів (ЦОС) розвивається вже понад півстоліття. За цей час створені ефективні алгоритми обробки сигналів, прогресивні технології виробництва цифрових сигнальних процесорів. І якщо, на перших етапах, методи ЦОС застосовувались, в основному, у військових радіотехнічних системах, то сьогодні діапазон використання ЦОС значно розширився: розпізнавання та синтез мови, редагування і компресія аудіо- та відеосигналів, фільтрації завад, спектральний аналіз. Основні сфери застосування цифрових методів та пристроїв опрацювання сигналів – радіотехніка, телекомунікація, автоматичне управління, телеметрія, робототехніка, гідроакустика, сейсмологія та багато інших [3].

Сутність цифрової обробки полягає в тому, що фізичний сигнал (напруга, струм та ін.) перетворюється в послідовність чисел, яка потім піддається математичним діям в обчислювальній пристрої. Трансформований цифровий сигнал (послідовність чисел) при необхідності може бути перетворений знову в напругу або струм [4].

**Постановка завдань.** Принцип побудови електронних пристроїв, режими роботи приладів залежить від характеру сигналів, які підлягають обробці.

Сигналом називається процес зміни у часі фізичного стану деякого параметра електричного пристрою, який [параметр] використовується для відображення, реєстрації та передавання повідомлень. Повідомлення нерозривно пов'язані із закладеною у них інформацією [3].

Сигнали, що використовуються в електронній техніці, поділяють на аналогові, дискретні (імпульсні) та цифрові.

Для неперервного за аргументом та значенням сигналу використовується термін аналоговий як синонім, який взято з термінології аналогових обчислювальних систем.

Терміном цифрові сигнали інколи користуються для опису дискретних сигналів, але цифрові сигнали формуються шляхом кодування дискретних сигналів. При цьому необхідно вибрати числову систему: двійкову, вісімкову, шіснадцяткову тощо.

Предметом даної статті є розгляд сигналів та їх перетворення й оцифрування.

**Викладення основного матеріалу. Аналогові сигнали.** Принципи побудови електронних пристроїв, режими роботи приладів залежать від характеру сигналів, які підлягають обробці.

Аналогові сигнали описуються неперервними функціями напруги, струму тощо. Джерелами аналогових сигналів є датчики різноманітних фізичних величин. Залежно від характеру зміни сигнали поділяють на постійні (такі, що повільно змінюються у часі) та змінні. Носієм інформації в постійних сигналах є його рівень щодо нуля напруги чи струму.

## ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

Математична модель детермінованого змінного сигналу в загальному вигляді описується формулою:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{N-1} X_{m,n} \sin(\omega_n t + \varphi_n), \quad (1)$$

де  $X_{m,n}$ ,  $\omega_n$ ,  $\varphi_n$  – відповідно амплітуда, частота та початкова фаза  $n$ -ої гармоніки;  $N$  – кількість гармонік.

Інформація, що передається сигналом (1), як правило, міститься в амплітудах складових. Сигнали (1) одержуються та перетворюються (підсилюються), наприклад, у звуковідтворювальній апаратурі. У системах автоматики та радіотехніки часто застосовують моногармонійний сигнал:

$$x(t) = X_{m,n} \sin(\omega_1 t + \varphi_1), \quad (2)$$

який може використовуватись як базовий для передавання інформації. При цьому інформація, що передається, може міститись у будь-якому з його параметрів – амплітуді, частоті, фазі – або одночасно в декількох з них.

Процес цілеспрямованої зміни параметрів базового сигналу за законом зміни інформації, що передається, називається модуляцією. Базовий сигнал при цьому називається несучим, а функція – несучою функцією [2].

На рис. 1, а, б, в проілюстровано найпростіший випадок, коли несуча моногармонічна функція  $x(t)$  з нульовою початковою фазою та частотою  $\omega_1$ , модулюється за амплітудою синусоїдним за формою сигналом  $x_\mu(t)$  з частотою  $\Omega$ . Промодульований сигнал, поданий на рис. 1, в, записують за формулою:

$$x_a(t) = X_m (1 + \mu \sin \Omega t) \sin \omega_1 t, \quad (3)$$

де  $\mu = \frac{X_\mu}{X_m}$  – глибина модуляції;  $X_\mu$  – амплітуда модулюючого сигналу.

Рис. 1, г ілюструє зміну базової функції за наявності модуляції за частотою.

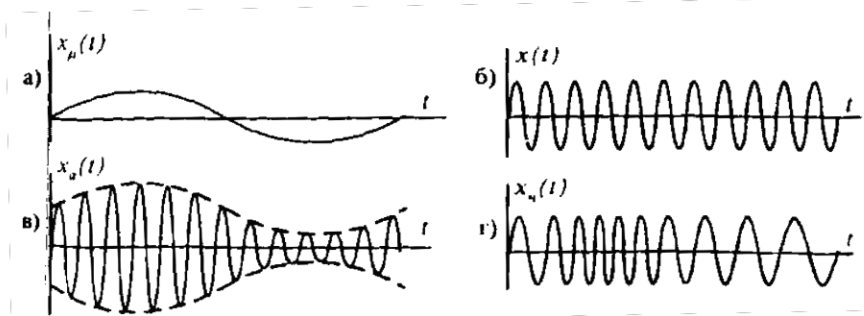


Рис. 1. Зміна базової функції за наявності модуляції за частотою

Якщо модулюючий сигнал  $X_L$  гармонічний, то модуляція називається гармонічною. Розрізняють амплітудну (АМ), частотну (ЧМ) та фазову (ФМ) модуляції. Останні дві завдяки взаємозв'язку між частотою та фазою часто об'єднуються під назвою кутової модуляції.

Пристрої, в яких забезпечується процес модуляції параметрів базової функції, називаються модуляторами.

Описані види модуляції використовують для передавання сигналів з різних датчиків (наприклад, датчиків рівня рідини у цистернах, температури у приміщеннях та ін.).

Не вдаючись у подробиці теорії модуляції, необхідно відзначити, що амплітудна модуляція більш проста в технічній реалізації порівняно з кутовими. Але водночас цей вид модуляції має низьку стійкість як щодо зовнішніх завад, так і щодо нестабільності параметрів апаратури, в якій вона використовується.

Кутові види модуляції, навпаки, мають достатньо складну технічну реалізацію, але при цьому вони більш стійкі щодо зовнішніх завад. Недолік їх полягає в тому, що такі сигнали займають значно ширший частотний спектр порівняно з АМ [3].

**Імпульси, імпульсні послідовності.** Підтримувати стабільність і точність параметрів аналогових пристроїв досить важко. На їх роботу впливають: технологічні допуски, які закладаються у процесі виробництва електронних компонентів, коливання температури, напруги живлення, космічне випромінювання, шуми і наведення, що створюються електронними приладами, іншими електричними колами та пристроями. До того ж реалізація

математичних і логічних операцій у більшості випадків або дуже складна, або навіть неможлива у роботі з аналоговими сигналами [3].

Окрім синусоїдних, як базові сигнали часто використовують різні за формою імпульсні послідовності. На рис. 2 зображений типовий одиничний імпульс та наведені у взаємозв'язку його амплітудні та часові параметри. До амплітудних належать:  $U_m$  – максимальне значення параметра імпульсу (його амплітуда);  $\Delta U$  – спад вершини, що визначається між рівнями  $U_m$  і  $0,9 U_m$ . До часових відносяться:  $t_\phi$ ,  $t_c$  – тривалість фронту та спаду імпульсу;  $t_i$  – тривалість імпульсу.

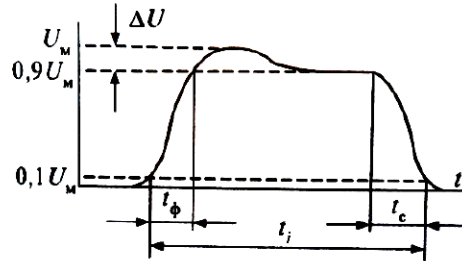


Рис. 2. Типовий одиничний імпульс

Параметри імпульсу у часі можуть змінюватись у широких межах і, як результат, одиничні імпульси можуть мати різну форму [4].

На рис. 3, а–в зображено відповідно експоненціальний, пилоподібний та трикутний імпульси.

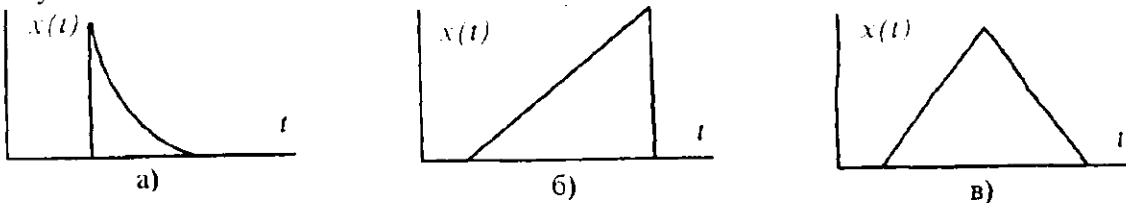


Рис. 3. Експоненціальний, пилоподібний та трикутний імпульси

Імпульсна послідовність характеризується наявністю пауз між імпульсами. За паузу тривалістю  $t_n$  обирають нульовий рівень напруги чи струму або такий рівень, який прирівнюється до нульового (рис. 4). Якщо тривалість імпульсів і пауз між ними у послідовності не змінюється, то говорять про періодичну послідовність, яка характеризується періодом  $T = t_i + t_n$ , коефіцієнтом заповнення  $S = t_i/T$  та шпаруватістю  $q = S^{-1}$ .

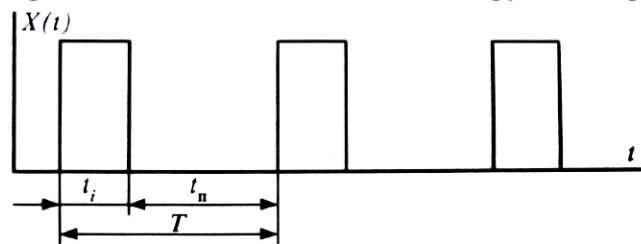


Рис. 4. Імпульсна послідовність

У теоретичних дослідженнях часто використовують ідеалізації імпульсів. Перша з них – це функція включення, або функція Хевісайда. У загальному випадку функцію включення, зміщену щодо початку осі координат на величину  $t_0$  (рис. 5, а), записують у такому вигляді [3]:

$$\sigma(t - t_0) = \begin{cases} 0 & \text{якщо } t < t_0; \\ 0,5 & \text{якщо } t = t_0; \\ 1 & \text{якщо } t > t_0. \end{cases} \quad (4)$$

У теорії сигналів функції включення широко використовують для опису імпульсних сигналів. Розглянемо імпульсний сигнал прямокутної форми, зображений на рис. 5, б. Його запис в аналітичній формі:

$$V(t, \xi) = \frac{\sigma\left(t + \frac{\xi}{2}\right) - \sigma\left(t - \frac{\xi}{2}\right)}{\xi}. \quad (5)$$

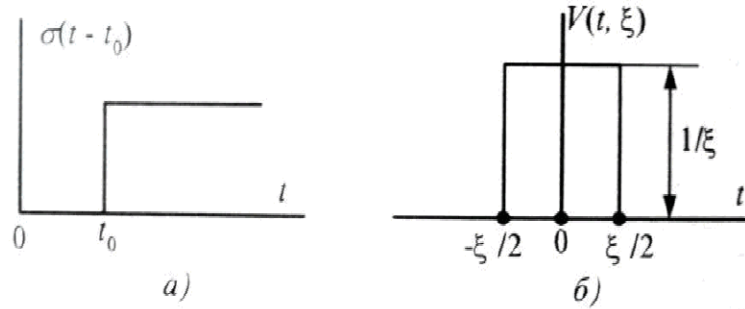


Рис. 5. Ідеалізація імпульсів

Особливість цього імпульсу полягає в тому, що за будь-якої величини параметру  $\xi$  його площа постійна і дорівнює одиниці:

$$S = \int_{-\infty}^{+\infty} V(t) dt = 1. \quad (6)$$

- а) функція включення, зміщена щодо початку осі координат на величину  $t_0$ ;
- б) імпульсний сигнал прямокутної форми.

Якщо  $\xi \rightarrow 0$ , враховуючи незмінність площі (5), (6), амплітуда імпульсу  $V(t, \xi)$  повинна збільшуватись до нескінченності.

Межа функції  $V(t, \xi)$ , якщо  $\xi \rightarrow 0$ , має назву дельта-функції, або функції Дірака [4]:

$$\delta(t) = \lim_{\xi \rightarrow 0} V(t, \xi). \quad (7)$$

Таким чином, дельта-функція (7), будучи рівною нулю всюди, окрім точки  $t = 0$ , характерна одиничним значенням інтегралу  $\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1$  і є математичною моделлю короткого імпульсу одиничної площі.

Особливість дельта-функції – її фізична розмірність збігається з розмірністю частоти.

Для передавання інформації імпульсною послідовністю остання модулюється за аналогією із синусоїдою. Залежно від модульованого параметру розрізняють модуляції амплітудно-імпульсну (АІМ), широтно-імпульсну (ШІМ), часово-імпульсну, яка поділяється на фазо-імпульсну (ФІМ) і частотно-імпульсну (ЧІМ).

Рис. 6 ілюструє особливості модуляції імпульсної послідовності  $x(t)$  (рис. 6, б) функцією  $x_{\mu}(t)$  (рис. 6, а) відповідно до АІМ  $x_A(t)$  (рис. 6, в), ШІМ  $x_{ш}(t)$  (рис. 6, г), ЧІМ  $x_{\chi}(t)$  (рис. 6, д).

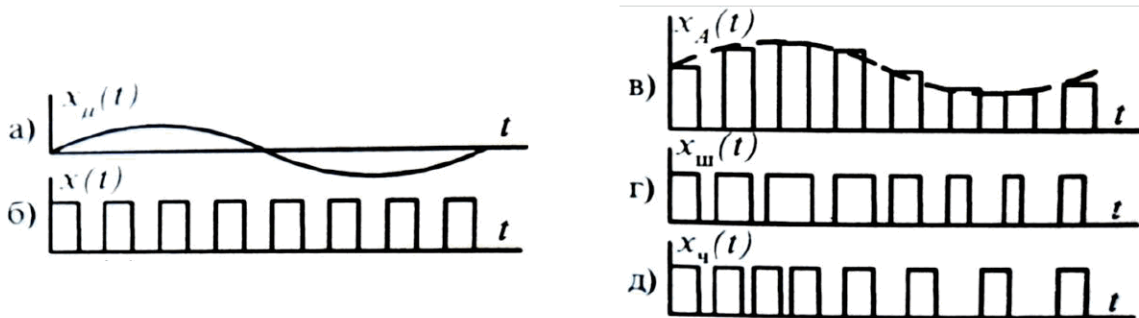


Рис. 6. Особливості модуляції імпульсної послідовності  $x(t)$

Перевага імпульсних сигналів порівняно з аналоговими полягає у тому, що за однакової середньої потужності імпульсного та аналогового сигналів енергія перших концентрується в інтервалі тривалості імпульсу. Тому у випадку коротких імпульсів миттєве значення потужності імпульсу набагато перевищує її середнє значення. Завдяки цьому відносний вплив зовнішніх факторів на сигнал є значно меншим.

Використання процесів модуляції не можливе без наявності зворотних процесів – виділення інформаційного сигналу з модульованого. Такі процеси називаються демодуляцією або детектуванням [3].

У процесі передавання інформації часто використовують операції перетворення неперервного сигналу на імпульсний та навпаки. Ця операція досить наочно проілюстрована на рис. 6, в.

Для перетворення аналогового сигналу на імпульсний необхідно здійснити дискретизацію

(квантування) за часом. Це означає, що неперервний час осі  $t$  замінюється дискретним з кроком (періодом дискретизації)  $T$  (рис. 7).

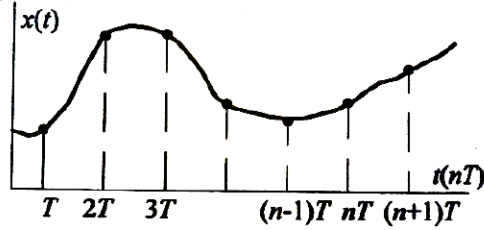


Рис. 7. Період дискретизації

Залежно від способу реалізації дискретизації за часом сформована імпульсна послідовність може мати різний математичний опис. У перетворенні інформаційних сигналів для цього використовують дельта-функцію (7) завдяки особливості її згортки:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\delta(t - nT)dt = x(nT). \quad (8)$$

Ця особливість відображає фільтрувальну властивість дельта-функції і полягає в тому, що після виконання операцій множення та інтегрування функція  $x(t)$  буде визначеною лише в точках дискретизації за часом  $nT$  (тобто функція визначається з точністю до кроку дискретизації  $nT$ ). Функція (8) називається дискретною. Величину кроку дискретизації за часом обирають відповідно до необхідної точності відтворення неперервного сигналу.

За теоремою В. А. Котельникова, максимальна частота  $f_{max}$  спектра сигналу, який може бути відновлений з дискретної послідовності за допомогою ряду Котельникова В.А., не може перевищувати величину  $f_{max} = 1/2 T$  [3].

Точність відтворення сигналу з імпульсної послідовності тим вища, чим вища частота дискретизації щодо верхньої частоти спектра інформаційного сигналу. Іншими словами, дискретизація за часом не пов'язана із втратою інформації, якщо частота дискретизації  $f_d = 1/T$  як мінімум у два рази перевищує верхню частоту  $f_{max}$  спектра сигналу. Крок дискретизації  $T$  може бути як постійним, так і змінним залежно від вимог, які ставлять під час відновлення сигналу [3].

Дискретні значення функції  $x(nT)$  можуть використовуватись для відновлення сигналу. Знову ж таки, на практиці використовують широкую гаму методів відновлення сигналу із квантованої послідовності  $\delta$  – імпульсів.

Це може бути лінійна апроксимація (рис. 8, а), ступінчаста (рис. 8, б) або перетворення на імпульсні послідовності із заданими видами модуляції (рис. 8, в).

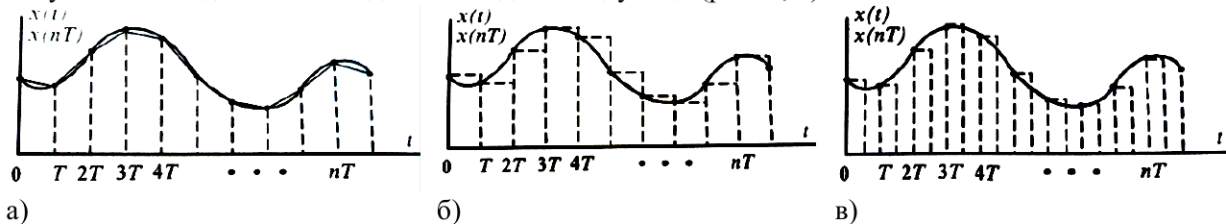


Рис. 8. а) лінійна апроксимація, б) ступінчаста; в) перетворення на імпульсні послідовності із заданими видами модуляції

**Оцифровування аналогових сигналів.** Для використання сучасних засобів обробки сигналів поряд із дискретизацією за часом використовують дискретизацію за рівнем. Цей спосіб дискретизації, який часто називають квантуванням за рівнем, полягає у тому, що безперервна множина значень рівнів замінюється дискретною із кроком  $\Delta x$  (рис. 9).

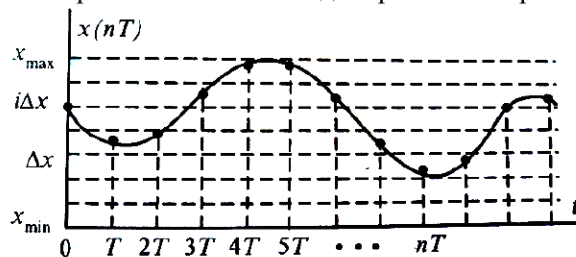


Рис. 9. Квантування за рівнем



## ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

Фактично квантування за рівнем являє собою округлення значень  $x(nT)$  функції  $x(t)$  із заданою точністю. Квантування за рівнем може бути як рівномірним, так і нерівномірним. За рівномірного квантування кількість можливих рівнів  $m$  дорівнює:

$$m = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{\Delta x}, \quad (9)$$

де  $x_{\max}$ ,  $x_{\min}$  – відповідно верхня і нижня межа зміни сигналу  $x(t)$ .

Величина  $\Delta x$  визначає похибку, що має місце у разі заміни поточного значення  $x(t)$  його дискретним рівнем  $i \cdot \Delta x = x_i$ . Ця похибка, яку обчислюють за формулою:  $\xi(x) = x(nT) - x_i$ , називається шумом квантування. Якщо під час квантування за рівнем будь-якому значенню змінної  $x(t)$ , що потрапляє в інтервал  $\left[ x_i - \frac{\Delta x}{2}, x_i + \frac{\Delta x}{2} \right]$ , надається рівень  $x_i$  то похибка  $\xi(x)$  не перевищуватиме половини кроку квантування:  $|\xi(x)_{\max}| = \frac{\Delta x}{2}$  [3].

У теорії сигналів широко використовують ймовірнісну оцінку шумів квантування [4].

Важливою характеристикою будь-якого сигналу є його інформативність, яка визначається кількісною характеристикою інформації. Для її визначення розглянемо спрощену дискретну модель реального сигналу, заданого на інтервалі часу  $T_c$  і квантованого за часом та за рівнем.

Використовуючи умови теореми В.А. Котельникова, знайдемо приблизну кількість дискретних за часом значень функції [3]:

$$n = \frac{T_c}{T} = 2 f_{\max} \cdot T_c, \quad (10)$$

де  $f_{\max}$  – максимальна частота у спектрі сигналу.

Кількість можливих рівнів квантування  $m$  визначають за формулою (9). Оскільки в кожному дискретний момент часу сигнал може набути одного з  $m$  можливих значень, то за час  $T_c$  кількість можливих комбінацій сигналу дорівнює:  $C_c = m^n$ .

Число  $C_c$  дає комбінаторну оцінку кількості інформації, що міститься у дискретному сигналі. Недолік використання  $C_c$  як міри інформації полягає в нелінійній його залежності від величини  $n$ , тобто від тривалості інтервалу  $T_c$ . Тому як міру кількості інформації  $I$  використовують логарифмічне перетворення від  $C_c$ :

$$I = \log_b C_c = n \log_b m, \quad (11)$$

в якому маємо лінійну залежність між вказаними параметрами. Вибір параметра  $b$  впливає лише на розмірність, тобто на одиницю виміру кількості інформації. Найчастіше обирають  $b = 2$ , при цьому  $I$  вимірюється у бітах (binary digit). Один біт – це найменша кількість інформації, що відповідає одному з двох рівноможливих повідомлень (так-ні; ввімкнути-вимкнути тощо). Повідомлення, в якому міститься набір з декількох бітів, називається словом. Слово з 8 біт називається байтом. Якщо, наприклад, припустити, що кількість рівнів квантування  $m$  описується словом з одного байта, то це означає, що весь діапазон рівнів  $x_{\max} - x_{\min}$  розбивається на  $m = 2^8 = 256$  кроків, функція визначатиметься з похибкою  $\xi(x) = (256 \cdot 2)^{-1} (x_{\max} - x_{\min})$  і в кожному дискретний момент часу може передаватися повідомлення про одне з її 256 можливих значень [1].

Широко використовують більші одиниці кількості інформації – кілобіт ( $2^{10}$  біт), мегабіт ( $2^{20}$  біт), гігабіт ( $2^{30}$  біт).

Звернувшись знову до процесу перетворення сигналів і взявши за «1» наявність короткочасного імпульсу, а за «0» – його відсутність, кожен відлік сигналу (рис. 9) можна передати у вигляді комбінації одиниць та нулів.

Процес перетворення повідомлення на дискретний сигнал називається кодуванням інформації, а множина різних кодових комбінацій, що отримуються за обраного правила кодування, – кодом [2].

Оскільки сигнали передаються переважно за допомогою провідників, то слово з одного байта може передаватися двопровідною лінією як послідовність «1» та «0» у визначені дискретні моменти часу. При цьому як передавач інформації, так і приймач повинні працювати в узгодженому дискретному часі. Така форма передавання інформації називається послідовною (послідовний формат) і використовується у довгих лініях зв'язку. У коротких лініях застосовується паралельна форма, за якої для кожного біта слова, що передається, використовується свій провідник (паралельний формат) [1].

Більшість сучасних систем обробки цифрової інформації опрацьовують слова, що вміщують ціле число байтів, – наприклад 1, 2, 4.

## ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

Водночас у розв'язанні нескладних задач часто використовують слова, що є напівбайтовими (чотирирозрядними). Іноді використовують навіть трирозрядні слова і числа.

**Висновки.** Розглянуто перетворення аналогового сигналу на послідовність сигналів, які умовно набувають лише значення «1» та «0».

Електронні системи, що оперують сигналами, які відповідають лише рівням «1» та «0» та використовуються для обробки інформації, поданої у вигляді чисел називаються цифровими, які є актуальними в даний час.

### Інформаційні джерела

1. Антонов В.М. Сучасні комп'ютерні мережі / В. М. Антонов. – К: «МК – Прес», 2005. – 480 с.
2. Караченцев В.Є. Комп'ютерна електротехніка: теорія і практикум / В.Є. Караченцев., В.О. Ліщина. – Луцьк: ВАТ «Волинська обласна друкарня», 2009. – 351с.
3. Могилевський М.М. Общая радиотехника / Могилевський М.М., Анохина Н.Д., Бревда Н.Н. – 2 – е изд; перераб. и доп. – К.: Высшая шк. Главное изд-во, 1985. – 287с.
4. Рябенський В.М. Цифрова схемотехніка: навч. посібник / Рябенський В.М., Жуйков В.Я., Гулий В. Д. – Львів: «Новий світ – 2000», 2009. – 736 с.

**Караченцев В.Е., Денисюк В.Ю., к.т.н.**

Луцкий национальный технический университет

### ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ОЦИФРОВКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

*В статье рассматриваются сигналы, их преобразования и оцифровка. В процессе передачи информации используются операции преобразования непрерывного сигнала на импульсный и наоборот. Для преобразования аналогового сигнала на импульсный необходимо осуществить дискретизацию (квантование) по времени. Точность воспроизведения сигнала с импульсной последовательности тем выше, чем выше частота дискретизации по верхней части спектра информационного сигнала.*

**Ключевые слова:** сигнал, электронное устройство, модуляция, импульсы, оцифровка.

**V. Karachentsev, V. Denisyuk**

Lutsk National Technical University

### TRANSFORMATION AND CALCULATION OF ELECTRIC SIGNALS

*The article deals with signals, their transformations and digitization. In the process of transmitting information, operations are used to convert a continuous signal to the pulse and vice versa. To convert an analog signal to a pulse, it is necessary to perform quantization over time. The accuracy of the signal reproduction from the pulse sequence is the higher then higher the sampling rate relative to the upper part of the information signal spectrum.*

**Keywords:** signal, electronic device, modulation, pulses, digitization.