

література

Міністерство освіти і науки України

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій



ВВЕДЕННЯ В ТЕОРІЮ ІНФОРМАЦІЇ

Посібник до вивчення дисципліни
«Теорія інформації»

для студентів за напрямом підготовки
6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»

Навчально-методична

Тернопіль
2017

УДК 681.3
В24

Укладачі:

Курко А.М., канд. техн. наук, доцент,
Решетник В.Я., канд. техн. наук, доцент.

Рецензенти:

І.Г. Добротвор, докт. техн. наук, професор.

Методичні вказівки розглянуто й затверджено на засіданні методичного семінару кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя протокол № 8 від 25 травня 2017 р.

Схвалено та рекомендовано до друку науково-методичною комісією факультету прикладних інформаційних технологій та електроінженерії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя протокол № 10 від 26 травня 2017 р.

Введення в теорія інформації : посібник до вивчення дисципліни
В24 теорія інформації для студентів за напрямом підготовки 6.050202
Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Укладачі :
Курко А.М., Решетник В.Я. – Тернопіль : Тернопільський національний
технічний університет імені Івана Пулюя, 2017 – 108 с.

УДК 681.3

Відповідальний за випуск: *А.М. Курко*, канд. техн. наук, доцент.

© Курко А.М., Решетник В.Я.,..... 2017

© Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя,..... 2017

ЗМІСТ

Вступ	4
§ 1 Поняття інформації, базові елементи, задачі та методи дисципліни.	
1.1. Що таке інформація.	5
1.2. Кількісна оцінка інформації.	11
1.3. Властивості ентропії.	15
1.4. Надмірність повідомлень.	16
§ 2 Сигнали інформації, їх властивості і математичні моделі.	
2.1. Сигнали, завади та їх класифікація.	21
2.2. Математичні моделі елементарних сигналів.	28
2.3. Математичні моделі складних неперервних сигналів.	29
2.4. Математичні моделі дискретних сигналів у цифрових системах.	33
§ 3 Випадкові сигнали, їх математичний опис і числові характеристики.	
3.1. Математичний опис випадкового сигналу як випадкової функції часу.	35
3.2. Обчислення характеристик випадкового сигналу за результатами експерименту.	39
3.3. Стаціонарні та ергодичні випадкові процеси.	40
§ 4 Спектральний аналіз стаціонарного випадкового сигналу.	
4.1. Кореляційна функція стаціонарного випадкового процесу.	41
4.2. Спектральна щільність стаціонарного випадкового процесу.	43
§ 5 Перетворення сигналів інформації. Модуляція, демодуляція, фільтрація неперервних та імпульсних сигналів.	
5.1. Поняття модуляції сигналу. Види модуляції.	45
5.2. Цифрові методи модуляції.	52
5.3. Маніпуляція.	53
§ 6 Цифрові технології запису та передачі інформації.	
6.1. Перетворення неперервного сигналу в дискретний кодований	
6.2. сигнал з імпульсно-ковою модуляцією.	57
6.3. Відтворення первинного неперервного сигналу за відліками дискретного сигналу.	61
§ 7 Кодування і декодування повідомлень.	
7.1. Позиційні системи числення.	63
7.2. Арифметичні та логічні бінарні операції.	68
7.3. Двійково-десяткові коди.	70
7.4. Характеристики кодів.	71
7.5. Завадостійке кодування. Двійкові коди з виявленням помилок.	72
7.6. Коди з виправленням помилок.	74
7.7. Оптимальний код Шеннона-Фено.	75
§ 8 Архівація даних.	
8.1. Категорії програм архіваторів.	78
8.2. Графічні формати для збереження зображення.	82
8.3. Характеристики відеофайлів та відеофлєсів.	86
8.4. Кодування звуку.	86
§ 9 Методи організації і ущільнення каналів зв'язку.	
9.1. Загальні фізичні характеристики і схеми організації каналів зв'язку.	88
9.2. Інформаційні характеристики каналів зв'язку.	93
9.3. Теорема К. Шеннона про пропускну здатність каналу зв'язку.	95
9.4. Частотний і часовий принципи ущільнення каналів зв'язку.	96
9.5. Вмикання комп'ютера в канал зв'язку. Структурна схема модему.	100
9.6. Поняття про сучасні комп'ютерно-інтегровані мережеві інформаційні системи.	101
Використані джерела	106

ВСТУП

Для студентів, що здобувають освіту в галузі знань «Автоматика та управління» за напрямками «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» і «Системна інженерія», важливе розуміння процесів, що стосуються одержання, підготовки, передачі, зберігання та обробки інформації, оскільки без поетапного виконання таких операцій неможливо здійснити необхідну керуючу дію, що є кінцевою метою функціонування будь-якої системи.

ТЕОРІЯ ІНФОРМАЦІЇ, як наука, вивчає питання оцінки кількості інформації, аналізу інформаційних характеристик джерел повідомлень і каналів зв'язку, можливості кодування та декодування повідомлень, щоб забезпечити максимальну швидкість їх передачі каналами зв'язку при наявності та відсутності завад.

В даному посібнику зроблено спробу подати у достатніх пропорціях рафіновані елементарні відомості з комбінаторики, теорії ймовірності, теореми теорії інформації, алгоритми обробки інформації для того, щоб адаптувати необхідний навчальний матеріал для студентів вказаних спеціальностей. Для цього аналізувалися різні джерела з метою пошуку найвдаліших, з методичної точки зору, пояснень тих чи інших тематичних матеріалів.

Запропонований підручник розрахований на вивчення дисципліни «Теорія інформації» в обсязі 18 год. лекційних занять, 36 год. лабораторних робіт і 18 год. практичних занять.

Окремі відомості, що методично випереджають навчальний матеріал інших дисциплін, доведеться сприймати «на віру», оскільки без їхнього розгляду втрачається цілісність. Частина матеріалу, що раніше вивчався в інших дисциплінах, потребує «переформатування» з метою кращого розуміння базових елементів та загальних принципів дисципліни.

Очевидно, що, для уточнення чи поглиблення знань, не зайвим буде скористатися можливостями Internet як в плані мобільності виконання навчальних завдань, так і в пошуку додаткових відомостей.

Вдячні рецензентам, зауваження яких допомогли лаконічніше та цілісніше подати викладений матеріал.

Автори

§ 1 Поняття інформації, базові елементи, задачі та методи дисципліни.

1.1. Що таке інформація.

Щоб, в подальшому, зрозуміти неприйнятність примітивно-побутового розуміння терміну ІНФОРМАЦІЯ доцільно оцінити коректність наступних висловлювань:

- інформація про закладену вибухівку не підтвердилася;
- за достовірну інформацію гарантується винагорода;
- з місця пригоди надходить суперечлива інформація.
- розповсюджені листівки можуть містити свідомо спотворену інформацію

Стикаючись з такими «шедеврами», мимоволі дивуєшся безграмотністю тих, хто оперує цим поняттям. Всім зрозуміло, що «спотворена», «не достовірна» «суперечлива» і т.д. так звана інформація є не що інше, як **дезінформація!** А це вже з галузі свідомого завдання шкоди. Така побутова безграмотність медійних засобів породжує спотворене сприйняття смислової складової повідомлення, тому звернемося до енциклопедичного визначення:

ІНФОРМАЦІЯ (від лат. *informatio* – роз'яснення, викладення) – **вміст** повідомлення або сигналу, **відомості**, що розглядаються в процесі їх передачі або сприйняття; одна з вихідних загальнонаукових категорій, що відображає **структуру** матерії і способи її пізнання, яка не зводиться до інших простіших понять.

Іншими, «не академічними» термінами: інформація з тих категорій, про які ми не знаємо, але вміємо виміряти та оцінити. За аналогією: точка, розмір, час, енергія ...

В наведеному визначенні інформація розглядається як явище двох складових: – **матеріальної** та **ідеальної**.

Матеріальним є носій повідомлення: магнітна стрічка зі звуковим сигналом, звукова хвиля від динаміка тощо.

Смислове навантаження повідомлення – складова **ідеальна**.

Можливо тепер необхідне майже філософське уточнення:

що таке **матеріальне** і що таке **ідеальне**?

Звернімося до знаменитостей:

„Якщо я з кимось поділюсь яблуком то мені перепаде половина і комусь – половина.

А якщо я поділюся ідеєю, то і у мене буде ідея, і ще у декого”.

Бернард Шоу

Не лишне підкреслити:

- не буває матерії без структури, як і структури без матерії;
- важливою властивістю «структури» та «інформації» є те, що вони не можуть бути істинними чи хибними (структура яка є, така є).

Спробуйте відповісти:

якщо Ви ксерокопіюєте, наприклад, фотографію, то що копіюється: інформація чи структура?

З одного боку (у побуті) ми говоримо про скопійовану інформацію, хоча, насправді, ксероксу «байдуже» є там інформація чи ні: він чітко відпрацьовує алгоритм. **Скопійована структура**, тобто в «технічному» відношенні надалі матиметься на увазі саме структура.

Не влізаючи у філософські тенета, надалі трактуватимемо ІНФОРМАЦІЮ в технічному відношенні тобто при всіх відмінностях у трактуванні цього поняття, незаперечним є те, що проявляється інформація завжди в матеріально-енергетичній формі у вигляді **сигналів**.

СИГНАЛ – зміна фізичної величини, що несе інформацію, кодовану певним чином, або синхронізована (завчасу обумовлена з одержувачем) відсутність зміни фізичної величини. Одне з фундаментальних понять кібернетики.

Очевидно, що у вигляді сигналу інформація формалізується.

ФОРМАЛІЗАЦІЯ – представлення знань у вигляді, доступному для кодування, тобто запис тих чи інших даних, що характеризуються, *по-перше*, фіксованим набором (множиною) уживаних символів (алфавітом) і, *по-друге*, фіксованою формою вживання і сполучення цих символів у іншій множині (правила утворення кодових комбінацій із символів вихідного алфавіту).

ДАНІ – отримані відомості, подані у формалізованому вигляді (літерами, цифрами, символами тощо) [3].

Дані обробляються комп'ютерами, для передачі даних використовуються комп'ютерні мережі, дані зберігаються в базах даних. **Дані – сировина для створення інформації**: перетворення й обробка даних дозволяє (з точки зору теорії інформації) витягнути *новизну* та перетворити її на знання.

У 50-і роки ХХ століття термін «інформація» як на побутовому рівні, так і у фахівців ототожнювався зі знаннями, що передаються природними чи штучними каналами.

Проте очевидно: щоб одержати нове знання, потрібні досвід, вміння та певний багаж попередніх знань як фундамент (знання не можна «перекачати» в іншу голову, як рідину в якусь ємність). Інформація, на противагу знанню, не пов'язана з конкретною особою, вона однаково доступна всім, хоча можливості перетворити її на знання в кожного свої, залежать від особистого досвіду. Те, що було осяянням генія, що він зафіксував на папері, можна тиражувати для всіх. **Інформація – перетворена форма знання** [2].

Таким чином прослідковується наступний ланцюжок:

СИГНАЛИ → ПОВІДОМЛЕННЯ → ДАНІ → ІНФОРМАЦІЯ → МЕТОДИ → ЗНАННЯ

ПОВІДОМЛЕННЯ – дані, що підлягають передачі.

АЛФАВІТ – множина різних знаків (символів).

ОБ'ЄМ АЛФАВІТУ – число знаків (символів).

АНСАМБЛЬ – множина знаків (символів) алфавіту $A=\{n_1, n_2, n_3, \dots n_m\}$, кожному з яких поставлено у відповідність кількісна ймовірнісна міра у вигляді

множини $P_m=\{p_1, p_2, p_3, \dots p_m\}$ з накладеним обмеженням $\sum_{i=1}^m P_i = 1$.

Питання:

– *для чого потрібна інформація?*

Будь-яка система намагається перебувати у зрівноваженому (впорядкованому) стані. Якщо виникає відхилення, то повинно існувати дещо, що керує системою і повертає її до впорядкованості, забезпечуючи стійкість. У технічному плані щоб визначити стан системи потрібно над нею виконати дослід – **керування**. Керування завжди є цілеспрямованим, таким, що встановлює систему у впорядкований (визначений) стан. У філософському розумінні **інформація – це та субстанція, міра якої визначає вибір адекватної керуючої дії**. За визначенням Р. Декарта:

СУБСТАНЦІЯ – річ, яка існує так, що не потребує для свого існування нічого, крім самої себе.

Наприклад, якщо зрівноваженим станом живого організму вважати умови існування, до яких організм пристосувався за час еволюції, то щоб вижити, йому весь час потрібно сприймати інформацію про навколишній світ і відповідно коригувати свою поведінку (весь час робити вибір адекватної керуючої дії). Виділимо наступні етапи кругообігу інформації:

- сприйняття інформації;
- підготовка інформації;
- передача та зберігання;
- обробка інформації;
- відображення інформації;
- вплив інформації.

На етапі **сприйняття** інформації здійснюється цілеспрямований витяг та аналіз інформації про об'єкт (процес), у результаті чого формується образ об'єкта, здійснюється його розпізнання та оцінка. При цьому відділяється інформація, що нас цікавить, від шумів.

На етапі **підготовки** інформації одержують сигнал у зручній для обробки або передачі (нормалізація, аналого-цифрове перетворення і т.д.) формі.

На етапі **передачі та зберігання** інформація пересилається або з одного місця в інше, або від одного моменту часу до другого.

На етапі **обробки** інформації виділяються загальні та суттєві взаємозалежності для вибору керуючих дій (прийняття рішень).

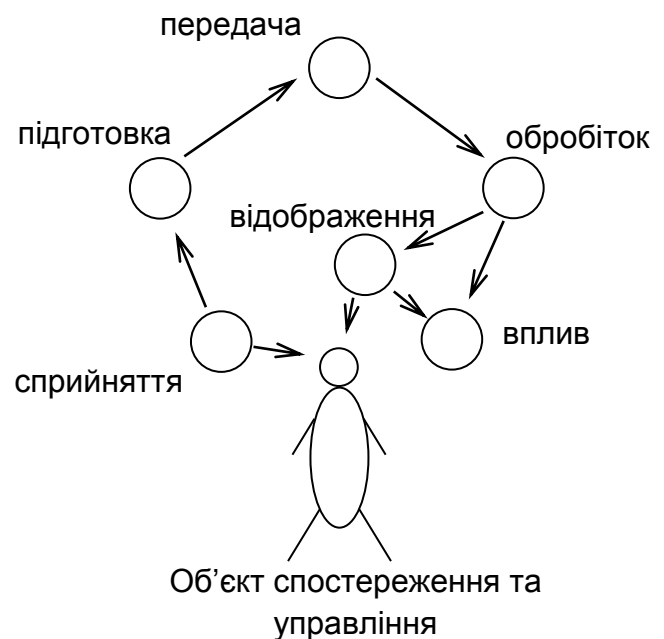


Рис. 1.1. Етапи кругообігу інформації

На етапі **відображення** інформації вона представляється людині у формі, що здатна впливати на його органи відчуття.

На етапі **впливу** інформація використовується для здійснення необхідних змін у системі [3].

Розглянемо поняття інформації в технічних системах.

Стан технічної системи визначається вектором фізичних величин $Y(t)$ на її виході. На один вхід системи діють фізичні величини $[x_1(t), x_2(t), x_3(t), \dots, x_n(t)] = X(t)$, які ми можемо цілеспрямовано змінювати регулятором, на другий вхід – величини $[q_1(t), q_2(t), q_3(t), \dots, q_n(t)] = Q(t)$, які збурюють систему незалежно від нашої волі. Вихідні величини – $[y_1(t), y_2(t), y_3(t), \dots, y_n(t)] = Y(t)$, які в процесі керування повинні підтримуватися на заданому рівні, під впливом вектора збурень $Q(t)$, весь час змінюють свої значення. Щоб їх підтримувати на заданому рівні, необхідно змінювати вектор $X(t)$, що еквівалентно керуванню. Отже, і в технічних системах **інформація – це значення фізичних величин, які визначають міру керуючої дії у кожен момент часу**. Враховуючи, що таку інформацію отримують шляхом вимірювань, будемо називати цю інформацію **вимірювальною** [4].

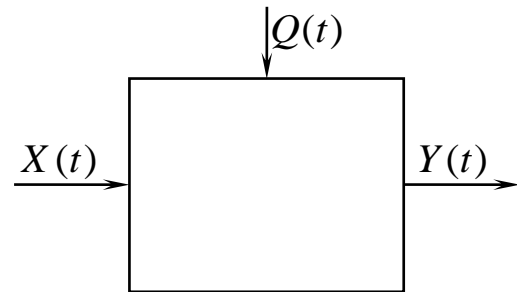


Рис. 1.2. Величини, які характеризують стан технічної системи

Доречно навести цитату, що є квінтесенцією відповіді на «суто технічне» питання „Для чого потрібна інформація?”.

„Кібернетика вивчає машини, живі організми та їх поєднання виключно з точки зору їх здатності сприймати певну інформацію, зберігати її в пам'яті, передавати по каналах зв'язку і переробляти її в сигнали, що впорядковують їх діяльність у відповідний бік. Процеси сприйняття інформації, її зберігання і передачі називаються у кібернетичі зв'язком, перетворення отриманої інформації в сигнали, які впорядковують діяльність машин і живих організмів – керуванням, ...Кібернетику визначають також як науку про способи сприйняття, зберігання, переробки і використання інформації в машинах, живих організмах та їх поєднаннях”.

А. М. Колмогоров

Отже, ми будемо розглядати інформацію у вузькому, прагматичному сенсі, як відомості про стан фізичних, технічних, біологічних, суспільних та будь-яких інших систем, які можна перетворити в код і передати по каналах зв'язку з метою використання для керування.

ТЕОРІЯ ІНФОРМАЦІЇ – наука, яка вивчає кількісні закономірності, пов'язані з отриманням, передачею, обробкою та зберіганням інформації.

Її основні задачі:

- оцінка кількості інформації необхідної для керування;
- математичний опис сигналів інформації;
- перетворення сигналів інформації в процесах модуляції, демодуляції, фільтрації, аналого-цифрового та цифро-аналогового перетворень;
- кодування та декодування сигналів, зберігання і захист інформації;
- передача сигналів інформації по каналах зв'язку;
- розробка цифрових технологій передачі інформації.

Задачі теорії інформації вирішуються методами математичного аналізу, теорії ймовірностей і випадкових функцій, неперервного та дискретних перетворень Лапласа, Фур'є та інших розділів математики.

Як і в будь-якій іншій теорії, в теорії інформації дотримуються своїх **постулатів**:

- джерело повідомлення здійснює вибір повідомлення з деякої множини з певною ймовірністю;
- повідомлення можуть передаватися по каналу зв'язку в закодованому виді. Кодовані повідомлення утворюють множину, що є взаємно однозначним відображенням множини повідомлень. Правило декодування відоме декодеру (записане в його програмі).
- повідомлення вважається прийнятим правильно, якщо в результаті декодування воно може бути в точності відновленим. При цьому не враховується, скільки часу пройшло з моменту передачі повідомлення до моменту закінчення декодування, та яка складність операцій кодування і декодування.
- кількість інформації не залежить від смислового вмісту повідомлення, від його емоційного впливу, корисності і навіть від його відношення до реальної дійсності.

Перш, ніж говорити про кількість інформації необхідно визначитися з об'єктами дослідження – джерелами повідомлень та їх моделями.

Процеси, що протікають в оточуючому нас середовищі, характеризуються як миттєвими фізичними показниками, так і розподіленими в часі.

ДЖЕРЕЛО ПОВІДОМЛЕННЯ – це будь-який матеріальний об'єкт разом із спостерігачем.

На рис. 1.3 зображено схему системи взаємозв'язаних об'єктів і спостерігачів, вкладених одне в одне, стосовно передачі відомостей про певний фізичний об'єкт певному одержувачеві. Для кожної стрілки частина системи, що розміщена ліворуч, може розглядатися як об'єкт спостереження, а розміщена ліворуч – як спостерігач. При цьому не має значення природа спостерігача: людина це, чи якийсь прилад. Його головне завдання полягає в перетворенні відомостей про стан об'єкта спостереження в форму, зручну для прийняття іншою людиною чи приладом.

Стан матеріального об'єкта, а отже, і його фізичні показники можуть набувати значення з певного дискретного набору значень. Джерело повідомлень з таким об'єктом є **дискретним**. Якщо стан матеріального об'єкта, відображений у його фізичних показниках, набуває значення з нескінченної множини можливих значень,

то таке джерело повідомлень є *неперервним*.

Якщо під час деякого часового проміжку дискретним джерелом вибрано деяке повідомлення a_i , яке ніяк не зумовлене повідомленням a_{i-1} , вибраним у попередній проміжок часу, то таке джерело є *дискретним джерелом без пам'яті*.

Якщо в деякому часовому проміжку дискретним джерелом вибрано повідомлення a_i , пов'язане з попереднім повідомленням a_{i-1} і статистично зумовлене ним, то таке джерело називається *дискретним джерелом із пам'яттю*.

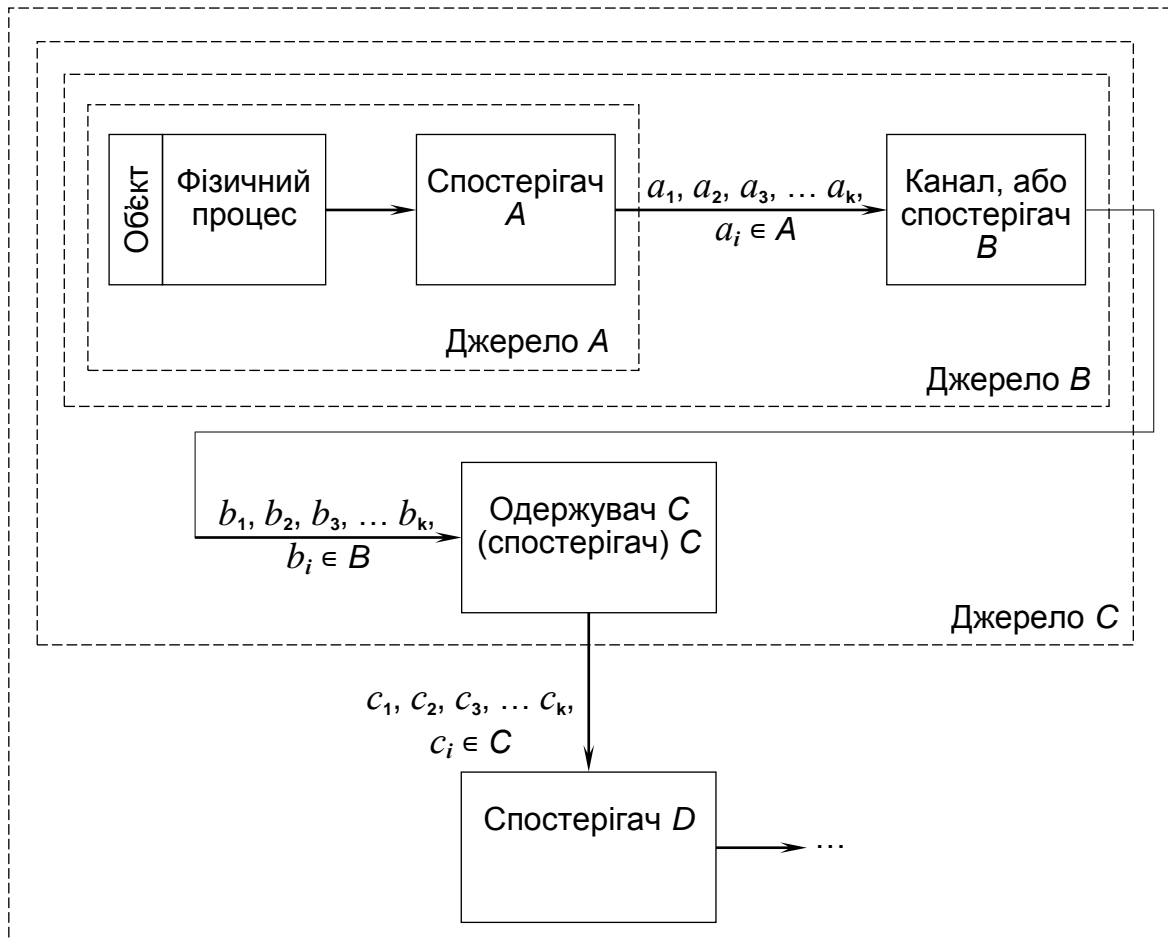


Рис. 1.3. Системи взаємозв'язаних об'єктів і спостерігачів.

Крім дискретних, можуть бути також *неперервні джерела повідомлень із пам'яттю та без пам'яті*.

Отже, відзначимо наступне:

- інформація створюється джерелом енергії при зміні енергетичних станів і проявляється **сигналом** при переході з одного стану до іншого;
- природа інформації матеріальна, інформація не є субстанцією, а є властивістю енергії;
- ентропія та інформація – властивості енергії одної природи (ентропія є потенціалом інформації, який реалізується приймачем);
- призначення інформації – керування динамічною системою;
- модель математичної ентропії Шеннона адекватна моделі природної ентропії Больцмана.

Необхідно зауважити, що *у технічному відношенні*

СИГНАЛ – це перехід джерела енергії з одного стану до іншого.

ІНФОРМАЦІЯ – сигнали і відомості, сприйняті приймачем та перетворені в сигнали керування або записані на будь-яких носіях.

З метою уникнення непорозумінь в термінології, необхідно акцентувати увагу на наступних видах інформації:

–за часом перетворення сигналів інформації у сигнали керування – два види:
первинна і вторинна.

До первинної інформації належить та, сигнали якої у реальному плині часу генеруються (створюються) джерелом, відразу сприймаються приймачем і перетворюються у сигнали керування.

Вторинна інформація – відомості, повідомлення. Це сигнали, записані на будь-якому носіїві інформації для зберігання у пам'яті, передачі приймачеві, перетворення у сигнали іншого виду. Ці сигнали не перетворюються відразу на сигнали керування, а використовуються в потрібний момент для вибору дії керування (ця інформація створюється у штучних системах – інформаційних системах, системах зв'язку, системах сервісного обслуговування, при керуванні політичними, економічними, фінансовими та багатьма іншими суспільними процесами чи системами.

–за видом джерела сигналів інформації – на **природну і штучну;**

До природної інформації відноситься інформація, створена джерелом неживої та живої природи, що використовується для керування у природних системах.

Штучна інформація створюється джерелом і системами, які є продуктом господарської чи суспільної діяльності людей.

–за видом систем керування, у яких використовується штучна інформація – на **технічну та суспільну.**

Технічна інформація створюється і використовується у технічних системах, а суспільна – у системах суспільної діяльності людей.

1.2. Кількісна оцінка інформації.

Для кількісної оцінки інформації вдаються до **теорії ймовірностей**, що в свою чергу, базується на **теорії множин**. Не заглиблюючись далі, акцентуємо: *щоб визначити множину, достатньо вказати характеристичну властивість елементів, тобто властивість, що притаманна всім елементам цієї множини і лише їм.* (Приклад: множина точок [елементів] даної лінії [множини]). Іншими словами: **множина відноситься до категорії якості, а не кількості.**

Місток між якістю (**ідеальним**) та кількістю (**матеріальним**) прокладають наступні аксіоми:

- 1.Кожній випадковій події **A** поставлене у відповідність невід'ємне число **P(A)**, що називається його **ймовірністю**. (**чомусь ідеальному** можна поставити у відповідність **щось з природи матеріального**).
- 2.Ймовірність всієї множини **P(E) = 1**.
- 3.Якщо події **A₁, A₂, A₃, ... A_n**, попарно несумісні, то

$$P(A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n) = P(A_1) + P(A_2) + P(A_3) + \dots + P(A_n)$$

Цього досить для розуміння подальших міркувань з приводу вимірювання інформації.

В якості основної характеристики повідомлення в теорії інформації прийнято величину, що називається **КІЛЬКІСТЬ ІНФОРМАЦІЇ**. Це поняття *пов'язане зі ступенем невизначеності*.

Нехай алфавіт джерела повідомлень становить m знаків (елементів), кожний з яких може бути елементом повідомлення. Кількість N можливих повідомлень довжини n дорівнює числу перестановок з необмеженими повтореннями:

$$N = m^n \quad (1.1)$$

Якщо для одержувача всі N повідомлень від джерела є *рівноймовірними*, то одержання конкретного повідомлення рівносильне для нього випадковому вибору одного з N_i повідомлень з ймовірністю $P_i = 1/N$. Тоді кількість інформації можна виразити через ймовірності надходження повідомлень

$$I = \log_2 N = \log_2 \frac{1}{P} = -\log_2 P \quad (1.2)$$

Очевидно, що чим більше N , тим більша ступінь невизначеності характеризує цей вибір і тим більш інформативним можна вважати повідомлення. То ж чи може число N бути мірою інформації?

Інтуїтивно хочеться наділити таку міру ще властивістю *адитивності*, тобто перевизначити її так, щоб вона була пропорційна довжині повідомлення (аналогія: при передачі та оплаті телеграми, важливо не її зміст, а загальна кількість знаків). Тому *мірою невизначеності вибору стану джерела з рівноймовірними станами приймають логарифм числа станів*:

$$I = \log N = \log m^n = n \log m \quad (1.3)$$

Цю логарифмічну функцію, що характеризує кількість інформації, запропонував американський вчений Р. Хартлі в 1928 р., а такий підхід до виміру кількості інформації називають **АЛФАВІТНИМ**.

[Згадайте властивості логарифмів!!!]

Яка кількість інформації припадає на один знак повідомлення?

Очевидно, що

$$H = \frac{1}{n} = \frac{n \log m}{n} = \log m \quad (1.4)$$

Принципово не важливо яка основа логарифму використовується для визначення кількості інформації та ентропії, але оскільки сучасні інформаційні технічні засоби мають два стійких стани, то зазвичай вибирають основу логарифма 2, тоді ентропія визначається як $H_0 = \log_2 m$, а *одиночку кількості інформації на один елемент повідомлення називають двійковою одиницею або **БІТОМ***.

Тобто одиниця невизначеності (двійкова одиниця або біт) є невизначеністю вибору з двох рівноймовірних подій (*bit* – скорочення від англ. *binary digit* – двійкова одиниця).

Оскільки з того, що $\log_2 m = 1$, випливає що $m = 2$, зрозуміло:

1 біт – це кількість інформації, котрою характеризується один двійковий елемент при рівноймовірних станах 0 і 1 (НІ або ТАК).

Математичною моделлю біта є однорозрядне двійкове число, ентропія та інформація якого дорівнюють 1-му біту.

Зі шкільного курсу інформатики Вам можуть згадатися інші визначення:

1 біт – кількість інформації, що міститься в повідомленні, яка зменшує невизначеність знань в 2 рази;

1 біт – кількість інформації, яка дозволяє вибрати правильний варіант з двох можливих.

У вичтехніці бітом називають найменшу «порцію» пам'яті, необхідну для збереження одного з двох символів «0» і «1», що використовуються для внутрішнього представлення даних і команд.

Двійкове повідомлення довжиною n містить n біт інформації. Очевидно, що для практичного використання необхідна «зручніша» одиниця виміру інформації, тому для виміру комп'ютерної інформації застосовується *восьми бітове число* – **Байт** – це одиниця кількості інформації, що дорівнює 8 бітам.

З того ж таки шкільного курсу інформатики: **байт** – група з 8 біт. Одним байтом можна виразити 256 різних значень (від 0 до 255).

Байт – вісім бінарних розрядів (бітів) – приймає 2^8 значень: від 0 до 255.

Тетрада (півбайт, нібл) – чотири двійкових розряди, половина байта – приймає 2^4 значень: від 0 до 15.

Слово – код, що складається з кількох байтів (найчастіше всього 2 байти – 16 розрядів, 4 байти – 32 розряди, 8 байт – 64 розряди).

Сучасні інформаційні засоби оперують з величезними об'ємами інформації, тому не зайве «мати перед очима» таблицю префіксів.

Якщо за основу логарифма прийняти 10, то ентропія виразиться в десяткових одиницях на один елемент повідомлення – **дітах**, тобто

$$1 \text{ дит} = \log_{10} 2 \text{ біт} = 3,32 \text{ біт}$$

ПРИКЛАД: Визначити мінімальну кількість зважувань, що здійснюються на рівноплечих шальках, щоб серед 27 ззовні однакових монет знайти одну фальшиву, (легшу).

«Теорія розв'язку» наступна:

Оскільки монети ззовні не відрізняються, то вони представляють джерело з рівноймовірними станами, а загальна невизначеність ансамбля, що характеризує його ентропію, складає $H_A = \log_2 27 \text{ біт}$.

Одне зважування здатне прояснити невизначеність ансамбля, що нараховує три можливих стани: ліва шалька легша; права шалька легша; шальки перебувають в рівновазі. Очевидно, що всі стани рівно-ймовірні (неможливо наперед віддати перевагу котромусь з них), то результат одного зважування представляє джерело з трьома рівноймовірними станами, а його ентропія становить $H_{3B} = \log_2 3 \text{ біт}$.

Оскільки для ентропії характерна вимога адитивності і при цьому

$H_A = \log_2 27 = \log_2 3^3 = 3 \log_2 3 = 3H_{3B}$, то для визначення фальшивої монети достатньо

Табл. 1.1. Основні одиниці вимірювання об'єму інформації

Вимірювання в байтах			
Назва	Символ	Степінь	
байт	Б	2^0	
кілобайт	КБ	2^{10}	$1 \text{ КБ} = 2^{10} \text{ Б} = 1024 \text{ Б}$
мегабайт	МБ	2^{20}	$1 \text{ МБ} = 2^{10} \text{ КБ} = 1024 \text{ КБ} = 2^{20} \text{ Б}$
гігабайт	ГБ	2^{30}	$1 \text{ ГБ} = 2^{10} \text{ МБ} = 1024 \text{ МБ} = 2^{30} \text{ Б}$
терабайт	ТБ	2^{40}	$1 \text{ ТБ} = 2^{10} \text{ ГБ} = 1024 \text{ ГБ} = 2^{40} \text{ Б}$
петабайт	ПБ	2^{50}	$1 \text{ ПБ} = 2^{10} \text{ ТБ} = 1024 \text{ ТБ} = 2^{50} \text{ Б}$
ексабайт	ЕБ	2^{60}	$1 \text{ ЕБ} = 2^{10} \text{ ПБ} = 1024 \text{ ПБ} = 2^{60} \text{ Б}$
зетабайт	ЗБ	2^{70}	$1 \text{ ЗБ} = 2^{10} \text{ ЕБ} = 1024 \text{ ЕБ} = 2^{70} \text{ Б}$
йотабайт	ЙБ	2^{80}	$1 \text{ ЙБ} = 2^{10} \text{ ЗБ} = 1024 \text{ ЗБ} = 2^{80} \text{ Б}$

провести три зважування.

«Практика розв'язку», тобто алгоритм визначення фальшивої монети наступний:

- при першому зважуванні на кожну шальку кладеться по дев'ять монет: фальшива монета буде або на одній з шальок, або серед решти, що не зважувались, якщо шальки зрівноважаться;
- друге зважування (за аналогією з першим) скорочує число монет, серед яких знаходиться фальшива монета, до трьох;
- третє, останнє, зважування дає можливість точно вказати фальшиву монету.

Розглянута вище оцінка інформації ґрунтується на припущенні про рівноймовірності всіх елементів повідомлення. **В загальному випадку** кожний з елементів з'являється в повідомленні з різною ймовірністю. Якщо повідомлення **не рівноймовірність** і **незалежні** одне від одного, то застосовують **ЙМОВІРНІСНИЙ ПІДХІД** і користуються поняттям **середньої інформації**:

$$I_{cp} = -n \sum_{i=1}^m P_i \log_2 P_i, \quad (1.5)$$

де P_i – ймовірність i -го повідомлення.

Середня кількість інформації на один елемент повідомлення

$$H = -\sum_{i=1}^m P_i \log_2 P_i. \quad (1.6)$$

Саме ці формули для оцінки кількості інформації та ентропії запропонував К. Шеннон у 1948 р.

Оскільки у формулах (1.5) та (1.6) присутні ймовірності появи того чи іншого елемента, то формули К. Шеннона відображають **потенційну кількість інформації та ентропію**.

Згідно К. Шеннону, **ІНФОРМАЦІЯ** – це відомості, що зменшують невизначеність (ентропію), яка існувала до їх одержання.

Інтуїтивно інформацію на якісному рівні можна визначити як нове знання про стан об'єкта спостереження, а її кількість – як кількість нового знання про нього.

ЕНТРОПІЯ – середня кількість інформації на один елемент повідомлення.

Величина H є мірою невпорядкованості стану джерела повідомлень і характеризує середню ступінь невизначеності стану цього джерела. У випадку, коли всі m різних станів джерела рівноймовірні, тобто $P_i = 1/m$, ентропія максимальна:

$$H_{\max} = -\sum_{i=1}^m \frac{1}{m} \log_2 \frac{1}{m} = -m \frac{1}{m} \log_2 \frac{1}{m} = \log_2 m. \quad (1.7)$$

Якщо повідомлення не рівноймовірні, то середня кількість інформації, що міститься в одному повідомленні, буде меншою.

ЗАУВАЖЕННЯ:

Надалі у формулах для визначення кількості інформації та ентропії завжди використовуватимемо логарифми з основою 2.

1.3. Властивості ентропії.

При рівноймовірності знаків (елементів) алфавіту з формули К. Шеннона випливає, що ентропія визначається виключно кількістю m знаків (елементів) алфавіту i , по суті, є характеристикою тільки алфавіту.

Якщо ж знаки (елементи) алфавіту нерівноймовірні, то алфавіт можна розглядати як дискретну випадкову величину, що задана статистичним розподілом частот появи знаків (елементів) (або ймовірностей) таблиці 1.2.

Таблиця 1.2.

Знаки (елементи) x_i	x_1	x_2	x_3	...	x_m
Частість n_i	n_1	n_2	n_3	...	n_m

Такий розподіл дає статистичний аналіз конкретних типів повідомлень (наприклад, українських текстів і т.д.). У цьому випадку ентропія відображає статистичні властивості деякої сукупності повідомлень. Формулу (1.6) можна представити у вигляді

$$H = -\sum_{i=1}^m P_i \log P_i = \sum_{i=1}^m P_i \log \frac{1}{P_i}. \quad (1.8)$$

Величину $\log \frac{1}{P_i}$ можна розглядати як часткову ентропію, що характеризує інформативність знаку (елемента) x_i , а ентропію H – як середнє значення часткових ентропій.

Функція $P_i \log P_i$ відображає вклад знаку (елемента) x_i в ентропію H .

При ймовірності появи знаку (елемента) $P_i = 1$ ця функція дорівнює нулю (рис.1.3.); далі зростає до свого максимуму, а при подальшому зменшенні P_i прямує до нуля.

Функція при $P_i = \frac{1}{e} = 0,37$ має максимум $\frac{1}{e} \log e = 0,531$, тобто координати максимуму (0,37; 0,531). Ентропія H – величина дійсна, невід’ємна і обмежена, тобто $H \geq 0$ (ця властивість випливає з того, що такі ж властивості притаманні для всіх доданків $P_i \log \frac{1}{P_i}$).

Ентропія дорівнює нулю, якщо повідомлення відоме завчасу (в цьому випадку кожний елемент повідомлення деяким символом з ймовірністю, що дорівнює одиниці, а ймовірність решти символів дорівнює нулю).

Ентропія максимальна, якщо всі знаки (елементи) алфавіту рівноймовірні, тобто $H_{\max} = \log m$.

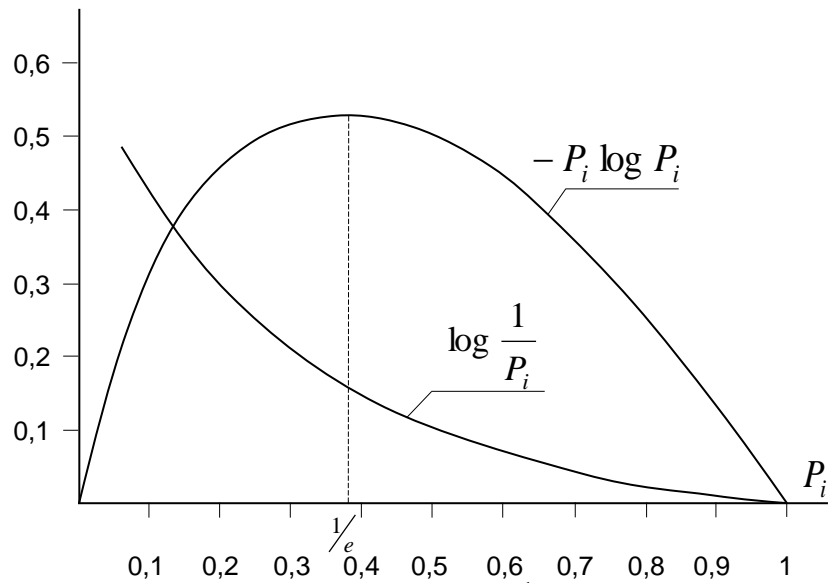


Рис. 1.4. Графіки функцій $\log \frac{1}{P_i}$ і $-P_i \log P_i$

Таким чином, ступінь невизначеності джерела інформації залежить не тільки від числа станів, але й від ймовірностей цих станів. При нерівноймовірних станах свобода вибору джерела обмежується, що повинно спричинити зменшення невизначеності. Якщо джерело інформації має, наприклад два можливих стани з ймовірностями 0,99 і 0,01, то невизначеність вибору у нього значно менша, ніж у джерела, що має два рівноймовірних стани: у першому випадку результат практично очевидний (реалізація стану, ймовірність якого дорівнює 0,99); у другому випадку невизначеність максимальна (оскільки жодного обґрунтованого припущення про результат вибору зробити не можливо). Зрозуміло, що незначна зміна ймовірностей станів спричиняє відповідно незначну зміну невизначеності вибору.

32.2. Надмірність повідомлень.

Чим більша ентропія, тим більшу кількість інформації містить у середньому кожний елемент повідомлення.

Нехай ентропії двох джерел повідомлень $H_1 < H_2$, а кількість інформації, що одержується від них, однакова, тобто $I = n_1 H_1 = n_2 H_2$, де n_1 і n_2 – довжина повідомлення від першого та другого джерел. Позначимо

$$\mu = \frac{n_2}{n_1} = \frac{H_1}{H_2} \quad (1.9)$$

При передачі однакової кількості інформації ПОВІДОМЛЕННЯ тим ДОВШЕ, чим МЕНША його ЕНТРОПІЯ.

Коефіцієнт стиску μ – величина, що характеризує ступінь укорочення повідомлення при переході до кодування станів елементів, що характеризується більшою ентропією.

Коефіцієнт надмірності r – частка зайвих елементів при переході до кодування станів елементів, що характеризуються більшою ентропією.

$$r = \frac{H_2 - H_1}{H_2} = 1 - \frac{H_1}{H_2} = 1 - \mu \quad (1.10)$$

За звичай використовують три коефіцієнти надмірності для смислових алфавітних знаків:

– часткова надмірність, обумовлена взаємозв'язком $r' = 1 - \frac{H'}{H}$;

– часткова надмірність, залежна від розподілу $r'' = 1 - \frac{H}{H_0}$;

– повна надмірність $r_0 = 1 - \frac{H'}{H_0}$.

Ці три величини пов'язані залежністю $r_0 = r' + r'' - r'r''$.

Завдяки надмірності повідомлення захищені від перешкод. Це використовується при завадостійкому кодуванні.

Українська абетка, включно з пропусками між словами, містить 34 елементи, отже при однакових ймовірностях появи всіх 34 елементів абетки, абсолютна невизначеність, яка припадає на один елемент, становить $H_0 = \log_2 34 = 5,087$ біт.

Ентропія української мови визначається шляхом послідовних наближень. За К. Шенноном в якості першого наближеного значення ентропії мови вибрано абсолютну ентропію мови $I_0 = \log_2 34$, тобто максимальну ентропію окремих незалежних літер (m - потужність абетки). Друге наближене значення ентропії української мови – це умовна ентропія

$H_1 = -\sum_{i=1}^m p(a_i) \log_2 p(a_i)$ посимвольної імовірності моделі відкритих текстів, в якій імовірність $p(a_i)$ літер збігається з частотою повторюваності літер в українській мові.

Наявність у природних мовах додаткових закономірностей зумовлює подальше зменшення ступеня невизначеності (ентропії) однієї літери мови. Тому за третє наближене значення ентропії української мови було вибрано умовну ентропію H_2 імовірнісного розподілу *біграм*, поділену на два (бо нас цікавить ентропія на один знак алфавіту). Іншими словами, $\frac{H_2}{2}$ визначає середню інформацію, що міститься у літері українського тексту, якщо відома попередня літера. Аналогічно четверте наближене значення ентропії мови – це умовна ентропія H_3 імовірнісного розподілу *триграм*, поділена на три і т.д..

Дослідження К. Шеннона показали, що найбільш точні наближення до ентропії букви для

осмислених текстів дають відношення $\frac{H_r}{r}$ при $r = 5, 6, \dots$. Із зростанням r ентропія зменшується і при $r \rightarrow \infty$ прагне до границі H_∞ , яка й приймається за ентропію мови H_m , тобто

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \frac{H_r}{r} = H_m \quad (1.11)$$

Обчислені наближені значення ентропії української мови зведені у представлено в таблиці 1.3.

Оскільки в текстах будь-якою мовою найбільш вживаним є пропуск між словами, то на першому етапі частість літер і n – *грам* підраховувались з врахуванням пропуску, а на другому етапі – без.

При вилученні пропуску, по-перше, зменшується кількість літер алфавіту, а по-друге, зростають частоти повторюваності літер і n – *грам*. Як результат

$$H_0^{(з\ проп)} > H_0^{(без\ проп)}.$$

Таблиця 1.3. Значення умовної ентропії української мови.

Наближене значення Ентропії	З урахуванням пропуску між словами (бітів/символ)	Без урахування пропуску між словами (бітів/символ)
H_0	5,09	5,04
H_1	4,51	4,52
$\frac{H_2}{2}$	3,47	3,60
$\frac{H_3}{3}$	3,14	3,26
$\frac{H_4}{4}$	2,78	2,93
$\frac{H_5}{5}$	1,58	1,62
$\frac{H_6}{6}$	1,41	1,55
$\frac{H_7}{7}$	1,26	1,47
$\frac{H_8}{8}$	1,25	1,45
$\frac{H_9}{9}$	1,25-1,40	1,45-1,62

Якщо пропуск розглядати додатковою «літерою» алфавіту, та ще й такою, що порівняно з рештою має дуже велику ймовірність, приходимо до зменшення наближених значень ентропії:

$$H_0^{(з проп)} < H_0^{(без проп)}.$$

У випадку наближення ентропії за допомогою розподілу дев'ятиграм розрахунки проводились окремо за текстами різної тематики і різних стилів сучасної української мови.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що ентропія української мови складає $1,25 - 1,40$ бітів/символ без урахування пропуску між словами і $1,45 - 1,62$ бітів/символ з його урахуванням. За цих умов надмірність української мови

$$\text{складає } D = 1 - \frac{H}{\log_2 m} \cdot 100, \text{ тобто } 72,5 - 75,4\%.$$

При цьому порівняння отриманих результатів ентропії української мови з аналогічними результатами, що отримані для російської та європейських мов дозволяє стверджувати:

1). Надмірність української мови знаходиться на тому ж рівні (близько 70%), що й надмірність інших мов. Це обумовлено біосоціальною природою мови. Такий рівень надмірності слугує захистом мовної комунікації від фізичних і психолінгвістичних вад;

2). Коливання надмірності пов'язані із зміною тематики, професійної і стилістичної орієнтації текстів. Мовні і художні тексти показують низький рівень надмірності (72% і нижче), а публіцистична та науково-технічна мова має надмірність на рівні 75% (інколи до 85%) [5].

Ми розглянули «класичні» підходи до розуміння інформації. Зрозуміло, що в повсякденні з'являються інші підходи і моделі для оцінки кількісної та якісної сторін інформації. Проте незмінним залишиться той факт, що природне призначення інформації – керування.

КЕРУВАННЯ – це приведення системи у визначений стан введенням у неї інформації.

Якщо система перебуває у визначеному стані її ентропія дорівнює нулю. Коли вона виходить з визначеного керуванням стану, то знаходиться у одному з множини можливих станів. Отримуючи інформацію про відхилення системи від визначеного стану і вводячи її у систему через органи керування, той хто керує приводить систему до попереднього або до нового визначеного стану, зводить ентропію системи до нуля.

Виходячи з ідеї «батька» кібернетики Н. Вінера та ідей К. Шеннона, У. Р. Ешбі сформулював закон, названий законом необхідної різноманітності, який так само як і закон Шеннона для процесів передачі інформації, є загальним для процесів керування. Суть цього закону полягає в наступному.

Для керування станом кібернетичної системи потрібен регулятор, що обмежує різноманітність збурюючих дій, які намагаються зруйнувати систему (вивести її за межі стійкості). При цьому регулятор дозволяє тільки таку різноманітність збурень, яка не виводить систему за межі стійкості. При дозволеній різноманітності станів системи P_c і різноманітності збурень $P_{зб}$, кількість різноманітності регулятора

$$P_{рег} = \frac{P_{зб}}{P_c}$$

Ця форма є однією з кількісних форм закону необхідної різноманітності. У логарифмічній формі цей закон має вигляд

$$\log P_{рег} = \log P_{зб} - \log P_c \quad (1.12)$$

Якщо $\log P_i$ – інформаційний вміст i -го об'єкту, тобто $I_i = \log P_i$, то остання формула може бути записана у вигляді

$$I_{\text{рег}} = I_{\text{зб}} - I_c \quad (1.13)$$

Це еквівалентно тому, що сума інформаційного вмісту регулятора та системи дорівнює інформаційному вмісту зовнішніх збурень. Отже поняття інформації пов'язане з поняттям різноманітності.

Академік В. М. Глушков стверджує, що причиною існуючої в природі різноманітності можна вважати неоднорідність у розподілі енергії (або речовини) у просторі та у часі. А інформацію В. М. Глушков характеризує як міру цієї неоднорідності. Будь-яка неоднорідність створює інформацію. Інформація охоплює як відомості, якими люди обмінюються між собою, так і відомості, які існують незалежно від людей. Наприклад, зірки і планети існують незалежно від того, знають про них люди чи ні. Існуючи об'єктивно, вони створюють неоднорідність у розподілі речовини та енергії і тому є джерелом інформації. Отже, об'єктивний характер інформації впливає з об'єктивності існування її джерела – різноманітності станів. **Там де немає можливості переходу з одного стану в інший – немає інформації.**

P.S.

Після концентрованого ознайомлення з темою не зайве подумати над наступними фразами та питаннями:

- в комп'ютері **обробляється** інформація? (якщо *обробляється*, то *змінюється*, чи ні?)
- працює **пристрій захисту** інформації;
- звукову фонограму перезаписали з більшою швидкістю звукової доріжки. Інформація про що міститься в перезаписаній копії?
- у Вас фотографія однієї людини, на якій вона виглядає товстою, хоча, насправді, вона худорлява. Інформація про що міститься на фотографії?
- повідомлення, закодоване числами від 0 до 255, передається натуральним бінарним кодом. Чому дорівнює апіорна ентропія повідомлення і кількість інформації в ньому?
- чому дорівнює апіорна ентропія повідомлення, закодованого десятковими числами від 0 до 31, якщо воно передається кодом Хеммінга.

ЗАДАЧА 1:

Визначити кількість інформації, яка міститься в телевізійному сигналі, що відповідає одному кадру розгортки за умови, що у кадрі 625 рядків, а сигнал, що відповідає одному рядку представлений послідовністю з 600 випадкових по амплітуді імпульсів, причому амплітуда імпульсу може прийняти будь-яке із 8 значень з кроком в 1 В.

ЗАДАЧА 2:

Розподіл знаків (символів) алфавіту має вигляд

$$p(x_1) = 0,1 p(x_2) = 0,1 p(x_3) = 0,1 \cdot p(x_4) = 0,7 ;$$

Визначити число знаків (символів) іншого алфавіту, в якого всі знаки рівноймовірні, а ентропія така ж як і у заданого алфавіту.

Коли самі відшукаєте правильні відповіді – здивуєтесь наскільки все просто, запам'ятаєте на все життя і втішитися за все людство!

§ 2 Сигнали інформації, їх властивості і математичні моделі.

2.1. Сигнали, завади та їх класифікація.

Для керування фізичними і технологічними об'єктами використовується інформація про стан об'єкту, яка отримується вимірюванням фізичних величин за допомогою приладів. Зміна фізичної величини на виході об'єкту називається сигналом.

Приймач інформації завжди знаходиться на деякій відстані від джерела інформації. Для перенесення інформації від джерела до приймача повинен існувати деякий носій. Таким носієм є сигнал.

Сигнал – це матеріальне втілення інформації, процес зміни деякої фізичної величини, пов'язаної з енергією.

Наприклад, звуковий сигнал – це процес переносу коливань тиску повітря звуковою енергією, світловий сигнал – це процес випромінювання і руху квантів світлової енергії. В залежності від виду енергії, якою відображається цей процес, сигнали поділяють на електричні, гідравлічні, пневматичні, механічні, світлові, акустичні (звукові), магнітні, теплові і т.д.

Електричні сигнали поділяють на два види:

- сигнали електричного струму;
- сигнали електромагнітного поля.

Для використання у системах автоматичного керування, телебачення та інших системах обробки сигнали вимірювальної, звукової та візуальної інформації перетворюють у сигнали електричного струму, а для безпроводової передачі на відстань – у сигнали електромагнітного поля – радіосигнали. Сигнали, які проходять каналами електрозв'язку поділяються на:

Аналогові або неперервні – сигнали, що представлені неперервними у часі фізичними процесами.

Аналоговий сигнал змінюється аналогічно фізичній величині. Значення неперервного сигналу на заданому інтервалі існує в будь-який довільний момент часу. Прикладом неперервного (аналогового) сигналу є сигнал напруги постійного струму, сигнал напруги змінного струму, сигнал напруги з радіомережі, тощо.

Аналогові пристрої – пристрої, що працюють з аналоговими сигналами.

Дискретні – сигнали, представлені своїми значеннями у дискретні моменти часу $t_1,$

$$t_2, t_3, \dots t_n, \text{ розділені проміжками часу } \Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \Delta t_n.$$

Дискретні сигнали поділяють на імпульсні та цифрові.

Імпульсний сигнал – це сигнал дискретний за часом і неперервний за рівнем.

Цифровий сигнал – сигнал, який має обмежену кількість фіксованих значень.

Цифровий сигнал є дискретним і за часом і за рівнем. Не вдаючись до математичних викладок, відзначимо наступне.

Двійковий сигнал – цифровий сигнал, який набуває тільки двох значень (проте дозволені деякі відхилення від цих значень)

Розрізняють два види цифрових сигналів: **потенційні** та **імпульсні**.

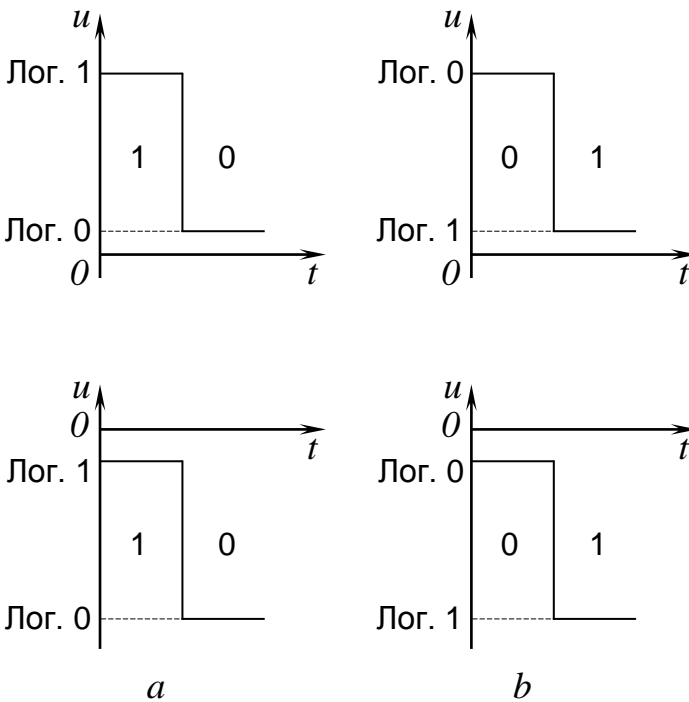


Рис. 2.1. Графіки потенційних сигналів.
a – позитивна логіка;
b – негативна логіка.

Потенційні двійкові сигнали мають два фіксованих рівні напруги: високий і низький. Ці сигнали діють в елементах логічних цифрових пристроїв, тому *дискретні рівні напруги* називають **логічними рівнями** і позначають «**логічна 1**» або «**логічний 0**».

Позитивна логіка – відповідність, при якій високому логічному рівню відповідає лог.1, а низькому – лог.0

Негативна логіка – відповідність, при якій низькому логічному рівню відповідає лог.1, а високому – лог.0

Під час передачі/прийому або перетворення цифрової інформації логічні рівні в одній і тій самій точці логічного елемента (**ЛЕ**) переходять з одного в інший за достатньо короткі проміжки часу.

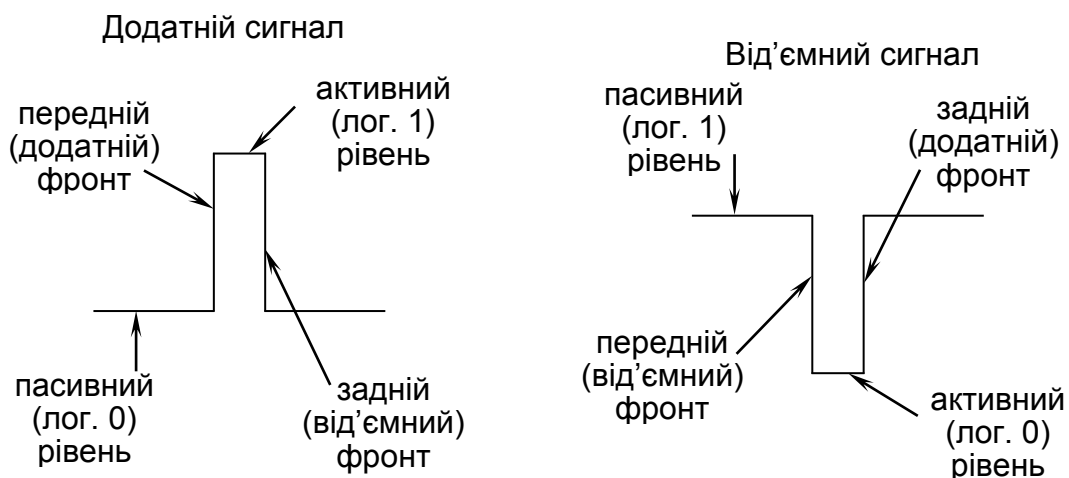


Рис. 2.5. Елементи цифрового сигналу

Перепад напруг – швидкі, майже стрибкоподібні зміни між двома рівнями напруги о одній точці.

Вирішальним чинником, що змінює стан логічного елемента, може бути не тільки високий чи низький рівень вхідної напруги, а також її перепад від лог. 1 до лог. 0, або навпаки.

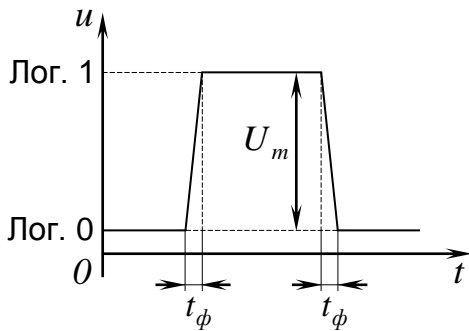


Рис. 2.2. Перепади напруг.

Меандр – періодичний процес, в якому позитивні та негативні перепади змінюються через однакові проміжки часу $T/2$.

Імпульсні двійкові сигнали – послідовність імпульсів напруги або струму.

Для них цифрою 1 позначають наявність імпульсу на певному часовому інтервалі, а цифрою 0 – відсутність імпульсу.

Якщо імпульси йдуть один за одним через однакові проміжки часу, то вони складають періодичну послідовність з періодом T .

Частота повторення імпульсів – кількість імпульсів за 1 с.

Варто зважити, що $F = \frac{1}{T}$.

Щільність q періодичних імпульсів – відношення інтервалу між імпульсами до тривалості самого імпульсу:

$$q = \frac{T - t_i}{t_i} \quad (2.1)$$

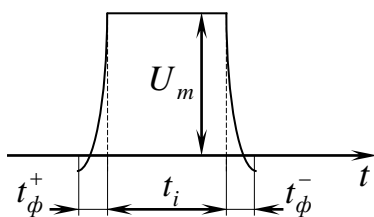


Рис. 2.4. Імпульс трапецеїдальної форми

Діапазон тривалостей імпульсів, необхідний для сучасної техніки, досить великий і лежить у межах від наносекунд ($1 \text{ нс} = 10^{-9} \text{ с}$) до мілісекунд ($1 \text{ мс} = 10^{-3} \text{ с}$). Частота їхнього повторення може бути від кількох герц до гігагерц ($1 \text{ ГГц} = 10^9 \text{ Гц}$).

Ідеальних прямокутних імпульсів не може бути через скінченність тривалості фронту і спаду, тому форма імпульсу буде трапецеїдальна (рис. 2.4). Але якщо $t_φ^+$ і $t_φ^-$ не перевищують $\frac{1}{10}$ тривалості

Основними параметрами перепадів є:

- розмір перепаду, тобто різниця рівнів;
- тривалість фронтів позитивного перепаду і негативного перепаду, тобто час зміни напруги від одного рівня до іншого (їх позначають також і відповідно).

Позитивні та негативні перепади, які повторюються по черзі, утворюють імпульси.

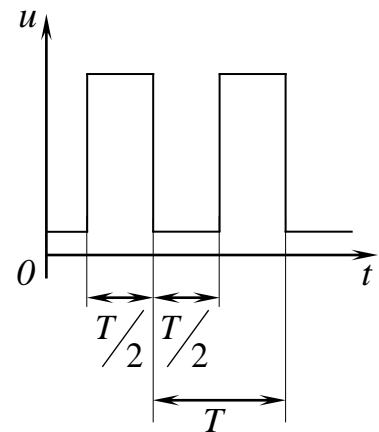


Рис. 2.3. Напруга імпульсів прямокутної форми (меандр).

імпульсу t_i , то застосовують назву **прямокутний імпульс**.

Амплітуда імпульсу U_m – найбільше відхилення напруги від часової осі.

Послідовності імпульсів можуть використовуватися не тільки для подання інформації у двійковій формі, але й як вторинні носійні коливання в системах з різними видами імпульсної модуляції (фазо-імпульсною, широтно-імпульсною тощо) первинним сигналом, у якому знаходиться інформація, що передається.

Тактові імпульси – імпульси, що не несуть інформацію, а необхідні для забезпечення синхронної роботи цифрових пристроїв (короткочасні потенційні рівні лог.1 (лог. 0), які забезпечують початок чергового такту в певний час).

Тактові імпульси мають ті самі логічні рівні, що й інформаційні імпульси.

Цифрові сигнали діляться на дві групи.

Одиночні цифрові сигнали:

- дозволяючі/забороняючі сигнали;
- сигналізуючі сигнали (прапорці);
- синхронізуючі сигнали (визначають момент часу виконання операції);

Згруповані (шинні) цифрові сигнали (коди):

- коди вибірок аналогових сигналів;
- коди адресації пристроїв (вибір потрібного пристрою);
- коди команд (інструкцій);
- коди даних.

ПЕРЕВАГИ ЦИФРОВИХ СИГНАЛІВ:

- допустимий складний багатоступеневий обробіток;
- тривале зберігання без втрат з можливістю багатократного копіювання без спотворень;
- якісна передача на великі відстані без спотворення;
- цифрові пристрої менш схильні до старіння, їх простіше налаштувати;
- поведінку цифрових пристроїв можна точно розрахувати і завжди передбачити.

НЕДОЛІКИ ЦИФРОВИХ СИГНАЛІВ:

- принципово менша гранична швидкодія цифрових пристроїв в порівнянні з аналоговими;
- інформаційна місткість цифрового сигналу суттєво менша, ніж аналогового, тому для заміни одного аналогового сигналу необхідно кілька цифрових сигналів (від 4 до 16) – код;
- для використання в реальних умовах необхідне перетворення аналогових сигналів у цифрові (на вході, АЦП) та цифрових сигналів у аналогові (на виході, ЦАП);
- при простому алгоритмі обробітку цифрові пристрої набагато складніші за аналогові.

Цифрові пристрої – пристрої, що працюють з цифровими сигналами.

ТИПИ ЦИФРОВИХ ПРИСТРОЇВ

Пристрої з жорсткою логікою роботи (вихідні сигнали в кожний момент жорстко визначаються вхідними сигналами і ця відповідність не може змінюватися).

Переваги:

пристрої з жорсткою логікою швидші, простіші для простих (елементарних) функцій.

Недоліки:

складні в розробці.

Пристрої з алгоритмом роботи що програмується (відповідність між вихідними та вхідними сигналами може змінюватися програмою – набором керуючих кодів).

Переваги:

простіші для складних функцій, простіші в розробці.

Недоліки:

пристрої з логікою що програмується повільніші.



Рис. 2.5. Цифрові елементи, вузли, мікросхеми.

Моделі цифрових пристроїв доцільно розглянути на прикладі найпростішого логічного елемента – інвертора (рис. 2.6).

Інверсія сигналу – зміна його рівня: лог. 0 → лог. 1; лог. 1 → лог. 0.

Таблиця істинності – таблиця, в якій перераховано вхідні та відповідні їм вихідні стани елемента.

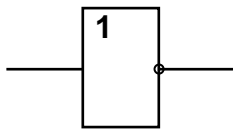
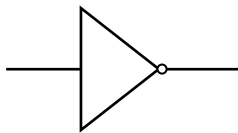
Перша модель – **ЛОГІЧНА** (нас не цікавить коли і як по часу співвідносяться вхід і вихід). Використовується в нешвидкісних пристроях ($\approx 20\%$).

Друга модель – модель **3 ЧАСОВИМИ ЗАТРИМКАМИ**.

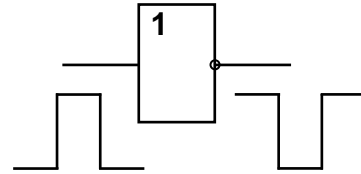
Перша та друга модель складають $\approx 80\%$.

Третя модель – модель **3 ВРАХУВАННЯМ ЕЛЕКТРИЧНИХ ЕФЕКТІВ** (електрична модель).

ІНВЕРТОР (елемент НЕ)



Інверсія сигналу



Таблиця істинності інвертора

Вхід	Вихід
0	1
1	0

Інверсія фронту

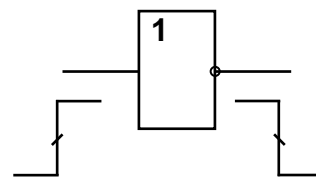
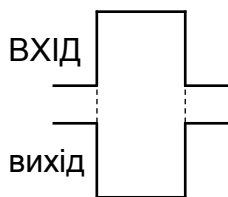
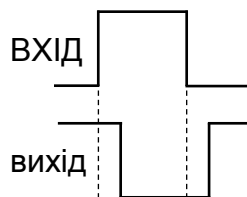


Рис. 2.6. Інвертор.

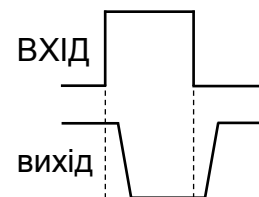
Три моделі (три рівні представлення) **цифрових пристроїв**.



1 рівень



2 рівень



3 рівень

Рис. 2.7. Три моделі (три рівні представлення) цифрових пристроїв.

Функція (2.1) задана аналітично, називається аналітичним виразом або **математичною моделлю** сигналу.

$$x = f[t, \omega, \varphi, A, B, C] \quad (2.1)$$

де t – поточний час;

ω, φ – деякі незалежні параметри;

A, B, C – постійні величини.

Кожний сигнал можна представити відповідною математичною моделлю. Якщо модель точно відображає властивості фізичного процесу, представленого сигналом, то модель вважають адекватною. Розбіжність між реальним сигналом і моделлю оцінюють за так званими критеріями адекватності.

При проходженні сигналів по каналах зв'язку на них накладаються сигнали інших процесів (температурних, електромагнітних, радіаційних), які називаються **завадами** або «шумами». Параметри «шумів» є випадковими величинами, а зміна «шумів» у часі є випадковим процесом. В залежності від джерела генерації завади поділяють на внутрішні і зовнішні.

Внутрішні завади – (шуми) поділяють на тепловий та дробовий шуми. Тепловий шум виникає через випадкового процесу руху вільних електронів у провідниках та резисторах, дробовий шум виникає в електронних лампах та транзисторах. У лампах він створюється випадковим процесом вильоту електронів з розжареного катоду, а у транзисторах – випадковим процесом дифузії неосновних носіїв заряду і рекомбінації пар «дірка – електрон» в $p-n$ переходах. Внутрішній шум по своїй природі є випадковим процесом з нормальним законом розподілу амплітуд. Такий шум називають «білим» шумом. Енергія внутрішніх шумів зосереджена в діапазоні звукових частот.

Зовнішні завади поділяють на індустриальні та атмосферні. Перші створюються електричними пристроями – пристроями електротранспорту, електрозварювання, системами запалювання авто, лініями електропередач, генераторами індукційних печей тощо. Основною причиною індустриальних завад є утворення електричної дуги при розриві великострумових ланцюгів у моменти комутації пристроїв. Навколо електричної дуги створюється змінне електромагнітне поле, яке у навколишніх провідниках наводить ЕРС завади.

Індустриальні завади можуть бути неперервним або імпульсним випадковим процесом. Атмосферні завади створюються розрядами зарядів атмосферної електрики. Струми цих розрядів досягають десятків кілоампер, завади від них мають характер випадкових імпульсів. Енергія атмосферних завад зосереджена в діапазоні довгих і середніх радіохвиль $0,1 \dots 2,0$ МГц. Тому ці завади добре прослуховуються при радіо прийомі на довгих та середніх хвилях.

Вплив завади на корисний сигнал залежить від співвідношення рівнів сигналів. Здатність інформаційного пристрою приймати сигнали в умовах завад оцінюють його **завадостійкістю**, яка визначається за формулою

$$L = 20 \lg \frac{U_c}{U_{ш}} \quad \text{дБ} \quad (2.2)$$

де U_c , $U_{ш}$ – напруга сигналу і напруга шуму відповідно.

Одиниця **один децибел** дБ дорівнює $0,1$ *Бела* – одиниці для вираження відношення двох величин за логарифмічною шкалою. Одиниця названа прізвиськом О. Белла, американського винахідника, який у 1876 р. запатентував систему телефонного зв'язку та заснував компанію «Белл Телефон».

В загальному випадку будь-який сигнал, що передається по каналу зв'язку, є сумою «корисного» сигналу і сигналу «шуму». Модель такого сигналу є випадковою функцією часу, яка характеризується законом розподілу ймовірностей, кореляційною функцією та спектральною густиною енергії.

Якщо числові значення параметрів корисного сигналу в багато разів більші за аналогічні параметри шумів, то наявністю випадкової компоненти в сигналі можна

знехтувати і розглядати сигнал як детермінований.

Детермінованим називають сигнал, заданий аналітично або графічно, значення якого можна **обчислити** для будь-якого довільного моменту часу.

Параметри сигналу, як фізичного носія інформації, діляться на два види:

- параметри відбору;
- інформаційні параметри.

Параметри відбору виділяють корисний сигнал із різноманіття всіх сигналів та завад.

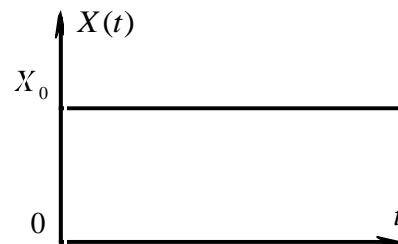
Інформаційні параметри служать для переносу інформації (зміна кожного з цих параметрів відображає повідомлення).

2.2. Математичні моделі елементарних сигналів.

До елементарних сигналів належать східчастий сигнал, одиничний імпульс і гармонічний синусоїдний сигнал.

1. Східчастий сигнал (або сигнал вмикання):

$$\begin{aligned} x(t) &= 0 \quad \text{при } t < 0; \\ x(t) &= X_0 \quad \text{при } t > 0. \end{aligned} \quad (2.3)$$



Інформативним параметром сигналу є його рівень. Числове значення рівня X_0 є інформацією. В системах передачі інформації представлений електричним сигналом постійного струму або напруги. Застосовується для передачі вимірювальної інформації в системах керування. За міжнародним стандартом для вводу вимірювальної інформації в системи керування застосовують уніфіковані сигнали постійного струму, які при зміні вимірюваної фізичної величини в заданому діапазоні змінюються в межах $0 \dots 5 \text{ мА}$; $0 \dots 20 \text{ мА}$; $4 \dots 20 \text{ мА}$; та сигнали напруги постійного струму, які змінюються в межах $0 \dots +10 \text{ В}$, або $0 \dots -10 \text{ В}$.

2. Одиничний імпульс:

$$x(t) = \delta(t - \tau) \quad (2.4)$$

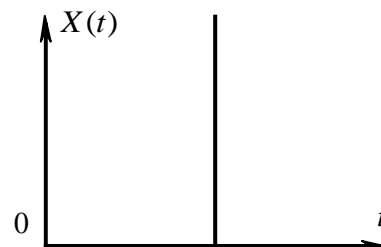


Рис. 2.9. Зображення одиничного імпульсного сигналу.

Для аналітичного вираження імпульсного сигналу використовують $\delta(t)$ -функцію Дірака, яка є аналітичним виразом абстрактного сигналу-імпульсу необмеженої амплітуди, тривалість якого дорівнює нулю, а площа $S = 1$.

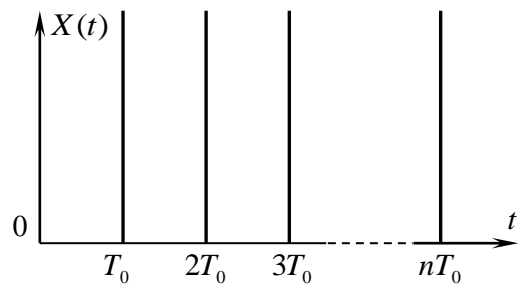
$$\delta(t - \tau) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \neq \tau; \\ \infty & \text{при } t = \tau \end{cases} \quad (2.5)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - \tau) dt = 1(t - \tau) \quad 0 < \tau < t$$

Єдиним інформативним параметром сигналу є його положення на осі часу – τ . Модель аналітичного виразу дискретизованих сигналів використовується в імпульсних та цифрових схемах.

3. Послідовність одиночних імпульсів можна подати математичною моделлю:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \delta(t - nT_0) \quad (2.6)$$



4. Гармонічний сигнал можна подати математичною моделлю:

$$\begin{aligned} x(t) &= A_m \cos(\omega t + \varphi) \\ &= A_m \cos\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi\right) \end{aligned} \quad (2.7)$$

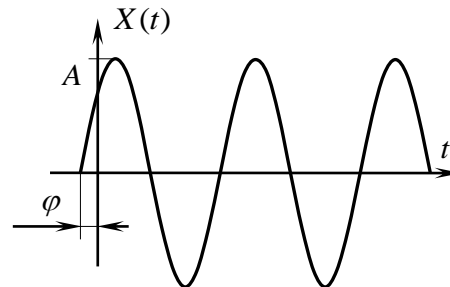


Рис. 2.10. Зображення гармонічного синусоїдального сигналу.

Гармонічний сигнал має три інформативних параметри – амплітуду A_m , частоту $1/T$, початкову фазу φ . Інформацію можна передавати кожним з них.

2.3. Математичні моделі складних неперервних сигналів.

Складні сигнали – це такі сигнали, для математичного опису яких важко знайти просту математичну формулу. Більшість реальних сигналів техніки зв'язку, інформаційних технологій, автоматичного керування рухомими об'єктами, медичної діагностики, техніки геологічної та електронної розвідки тощо, є складними квазідетермінованими сигналами.

Квазідетермінованим називають такий сигнал, у якому на детермінований у часі сигнал накладається випадковий процес. При цьому випадковість обумовлена не тільки завадами, але й самим джерелом інформації.

Прикладом такого сигналу може бути узагальнений сигнал телефонної розмови, перетворений мікрофоном у сигнал змінного електричного струму з детермінованим значенням постійної складової та випадковими значеннями амплітуд і періодів коливань. Іншим прикладом такого сигналу є узагальнений сигнал електрокардіограм, який є складним періодичним сигналом на фоні шумів, період і амплітуда якого змінюється випадково, залежно від стану людини. Таким же сигналом є сигнал керування на вході «автопілоту» або системи керування ракетою, який змінюється залежно від умов довкілля.

Складні детерміновані сигнали можна представити сумою елементарних сигналів. Для аналізу складних детермінованих сигналів використовують математичний апарат розкладання складної функції на суму елементарних. Для розкладання використовують системи ортогональних функцій, які на деякому інтервалі часу задовольняють умові:

$$k \neq n$$

$$\frac{1}{t_k - t_n} \int_{t_n}^{t_k} \varphi_k(t) \varphi_n(t) dt = 0, \dots k = 1, 2, 3, \dots N \quad (2.8)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots N$$

Найчастіше вживається розкладання в ряд Фур'є по системі тригонометричних функцій, або розкладання в ряд Фур'є по системі комплексних експоненціальних функцій, як показано нижче. Застосовується також розкладання в ряд по системах інших ортогональних функцій – Лагранжа, Уолша, Хаара, Котельнікова. Вибір конкретної системи функцій залежить від умов конкретної задачі

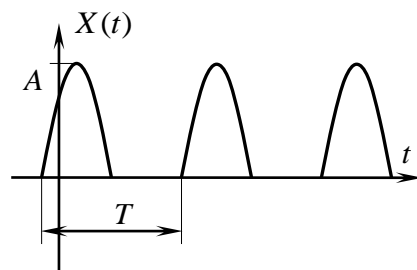


Рис. 2.11. Зображення періодичного несинусоїдального сигналу однопівперіодного детектора

Система ортогональних функцій, яка використовується для розкладання складного детермінованого сигналу в ряд, називається узагальненим рядом Фур'є, а відповідні коефіцієнти A_k називають узагальненим спектром Фур'є.

Наприклад, періодичний несинусоїдальний сигнал, зображений на рис. 2.12. може бути представлений сумою елементарних синусоїдних сигналів з частотами $\omega_1, 2\omega_1, 3\omega_1, \dots, n\omega_1$ і т.д.

Для вилучення інформації, яка передається складним сигналом, необхідно розкласти його на елементарні складові і зробити аналіз. Як побачимо далі, такий розклад називається **спектральним розкладом** або **спектральним аналізом**.

Елементарні сигнали, розглянуті нами, було зручно розглядати як функції часу.

Для розгляду складних сигналів доцільно перейти від часової області до частотної, тобто розглядати складні сигнали як функції частоти. Доведено, що між обома поданнями існує повна відповідність – функції, поданій у часовій області, завжди відповідає одна єдина функція у частотній області і навпаки.

Отже, модель складного сигналу, подана тригонометричним рядом Фур'є, має вигляд:

$$x(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=0}^{\infty} A_k \cos\left(k \frac{2\pi}{T} t - \varphi_k\right) \quad (2.9)$$

$$A_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt \quad (2.10)$$

$$A_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos k\omega t dt \quad (2.11)$$

де A_0 – постійна складова (середнє значення);

A_k – амплітуда k -ої гармоніки.

Періодичні детерміновані сигнали характеризуються середнім значенням A_0 і частотним спектром, який утворює набір коефіцієнтів A_k , $k = 1, 2, 3, \dots$. Кожна складова A_k цього ряду називається **гармонікою**.

Спектр амплітуд – сукупність коефіцієнтів A_k .

Спектр амплітуд показує з яких елементарних гармонічних коливань складається складний сигнал (частоти цих коливань) і як розподіляються амплітуди цих коливань.

Спектр фаз – сукупність значень φ_k .

Спектр фаз показує початкові фази складових і їх розподіл по осі частот.

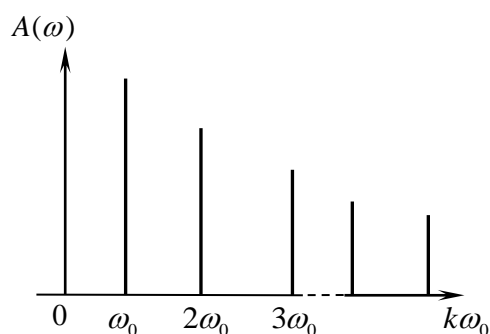


Рис. 2.12. Частотний спектр періодичного сигналу.

Спектр амплітуд і спектр фаз однозначно визначають сигнал. Але для багатьох практичних задач достатнім є аналіз тільки спектру амплітуд.

Спектри періодичних сигналів є лінійчатими, амплітуди гармонік зменшуються з зростанням частоти, як показано на рис. 2.6.

Спектри неперіодичних сигналів є суцільними. Функціональне перетворення сигналу $x(t)$ з часової області у частотну подається прямим перетворенням Фур'є:

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.12)$$

Перехід від частотної області до часової здійснюється зворотним перетворенням Фур'є, яке називається інтегралом Фур'є

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2.13)$$

Формули (2.12) і (2.13) називають парою перетворень Фур'є. Їх застосування для спектрального аналізу періодичних і випадкових сигналів розглянуто у наступних розділах. За першою з них можна обчислити $S(j\omega)$ – комплексну функцію, яка містить інформацію про спектр амплітуд і про спектр фаз. Модуль цієї функції $S(\omega)$ називають спектральною густиною або спектральною щільністю сигналу. Енергія сигналу пропорційна квадрату $S(\omega)$.

$$W = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} [S(\omega)]^2 d\omega \quad (2.14)$$

Отже, квадрат модуля спектральної щільності визначає розподіл енергії за складовими спектру.

Для реалізації методів спектрального аналізу на основі сучасних комп'ютерних технологій необхідно від пари неперервних перетворень Фур'є перейти до дискретних.

У наступному підрозділі показано як від моделі неперервного сигналу перейти до моделі дискретного сигналу. Цифрова обчислювальна машина не сприймає неперервні сигнали. Вона сприймає тільки числа, переведені в код. Отже, для обчислення інтегралів та похідних для неперервних функцій вони повинні бути дискретизовані і представлені числами на кожному кроці дискретизації. Операції дискретизації і кодування розглядаються далі в розділах VI і VII. Математичний аспект дискретизації неперервної функції полягає у тому, що неперервна у часі функція подається дискретним рядом відліків, здійснених з деяким періодом. Інтеграл неперервної функції замінюється сумою елементарних дискретних площ, а диференціальні рівняння замінюються різницевиими. Послідовність цих перетворень показана у наступному підрозділі.

Для розв'язання практичних задач спектрального розкладу сигналів на рівні користувача ЕОМ на сучасному етапі розроблено і випробувано багато програм комп'ютерного Фур'є-аналізу складних детермінованих і випадкових процесів. Одним з сучасних пакетів програм цифрової обробки сигналів є пакет Signal Processing Toolbox, в додатку MatLAB5.X [9]. Цей пакет складається з програм, які реалізують формування сигналів з заданою спектральною густиною, їх розклад і аналіз за перетворенням Фур'є і Гілберта, обчислення кореляційних функцій спектральної густини.

Застосовуються також розкладання в ряд за системами інших ортогональних функцій – Лагранжа, Уолта, Хаара, Котельнікова. Вибір конкретної системи функцій залежить від умов конкретної задачі.

2.4. Математичні моделі дискретних сигналів у цифрових системах.

Для математичного опису цифрових систем автоматичного керування використовують періодичний імпульсний сигнал, який у часовій області можна подати математичною моделлю виду:

$$x^*(t) = \sum_{n=0}^{\infty} x(nT_0) \cdot \delta(t - nT_0) \cdot s(t - nT_0) \quad (2.15)$$

де T_0 – період імпульсів;

$x(nT_0)$ – функція зміни амплітуди імпульсів;

$\delta(t - nT_0)$ – послідовність елементарних імпульсів, коливання-носії;

$s(t - nT_0)$ – функція, яка задає форму імпульсів.

Для коротких прямокутних імпульсів $S(t - nT_0) = 1$, з (2.14) маємо:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} x(nT_0) \cdot \delta(t - nT_0) \quad (2.16)$$

Наведений аналітичний вираз є моделлю сигналу, який є послідовністю коротких прямокутних імпульсів. Модель використовується для математичного опису імпульсних і цифрових систем керування.

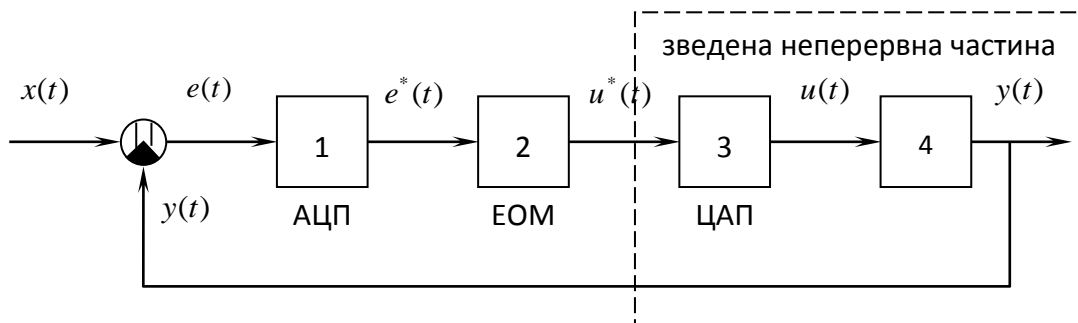


Рис. 2.13. Структурна схема дискретної системи керування.

1 – імпульсний елемент; 2 – цифровий регулятор; 3 – естраполятор (фіксатор) нульового порядку; 4 – об'єкт керування

З теорії імпульсних систем відомо, що дискретна система автоматичного керування складається з неперервної частини та імпульсного елемента. Структурна схема дискретної системи зображена на рис. 2.7. Імпульсний елемент – це пристрій, який перетворює неперервний сигнал інформації в дискретний, у послідовність імпульсів або код. Його роль виконує аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Роль регулятора виконує ЕОМ, яка обчислює сигнал керування $U^*(t)$, який є дискретним сигналом. За допомогою фіксатора 3, роль якого виконує цифро-аналоговий перетворювач ЦАП цей сигнал перетворюється у неперервний сигнал $U(t)$ керування регулюючим органом безпосередньо на об'єкті.

Для пояснення математичної моделі імпульсного сигналу (2.15), умовно поділимо імпульсний елемент на дві частини:

– найпростіший імпульсний елемент (НІЕ) – це перемикач K , який вмикається на дуже короткий час з періодом T_0 і видає послідовність коротких імпульсів, амплітуда яких змінюється за законом вхідного сигналу $x(t)$.

– формуючий елемент (ФЕ) – це елемент, який формує з послідовності модульованих за амплітудою імпульсів імпульси заданої форми – прямокутної, експоненціальної, трикутної чи т.п. В іншому прикладі це імпульси прямокутні з малою щільністю.

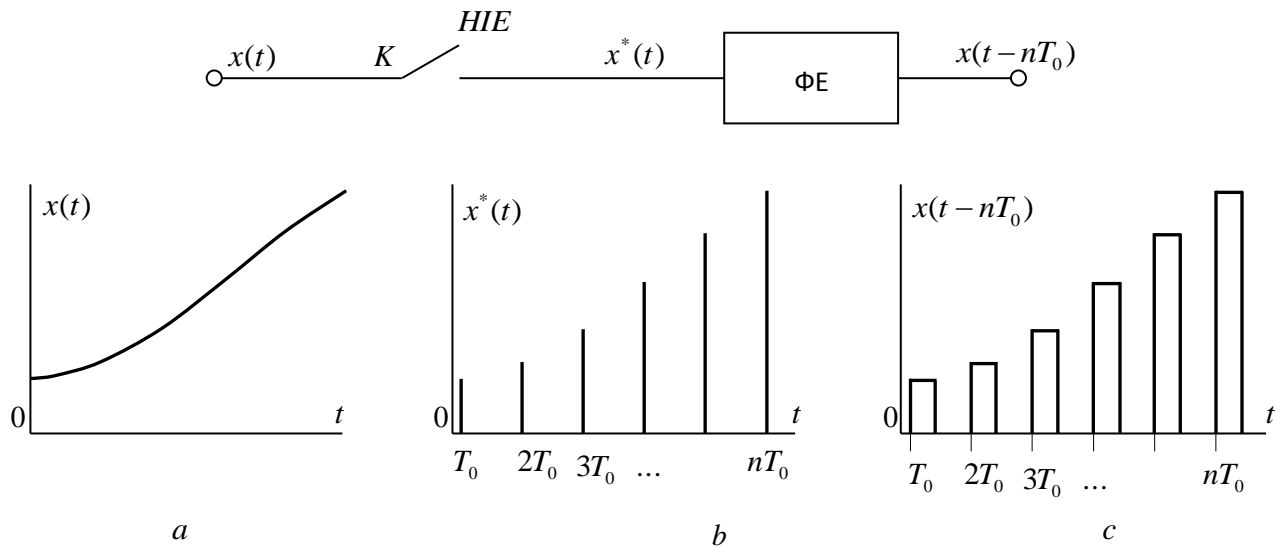


Рис. 2.14. Перетворення сигналу імпульсним елементом.

Для аналізу і синтезу цифрових систем керування, інформація у них представлена послідовністю імпульсів, застосовують дискретне перетворення Лапласа, яке встановлює зв'язок між сигналом $x^*(t)$ і його зображенням $X^*(p)$. Якщо зображення Лапласа для неперервного сигналу $x(t)$ відповідає інтервалу (2.16),

$$X(p) = L[x(t)] = \int_0^{\infty} x(t) \cdot e^{-pt} dt \quad (2.17)$$

то для дискретного сигналу інтеграл замінюємо сумою дискретних значень і отримуємо (2.17):

$$X(p) = D[x^*(t)] = \sum_{n=0}^{\infty} x(nT_0) \cdot e^{-pnT_0} \quad (2.18)$$

Якщо у формулі (2.17) зробити заміну $e^{-pT_0} = Z$, то отримаємо аналітичний вираз дискретного сигналу (2.18):

$$X(z) = \sum_{n=0}^{\infty} x(nT_0) \cdot z^{-n} \quad (2.19)$$

Функція $X(z)$ є z -зображенням неперервного сигналу $x(t)$. Переходом до зворотного z -зображення отримують різницеве рівняння для обчислення сигналу на кожному кроці дискретизації.

Якщо в дискретному перетворенні Лапласа (2.18) виконати заміну $p = j\omega$ (ω – частота імпульсного сигналу), то отримаємо дискретний ряд Фур'є.

$$X^*(j\omega) = \sum_{n=0}^{\infty} x(nT_0) \cdot e^{-j\omega nT_0} \quad (2.20)$$

Це говорить про те, що періодичний імпульсний сигнал складається з гармонічних синусоїдних складових.

Частотний спектр неперіодичних сигналів при умові абсолютної інтегрованості функції $x(t)$, на інтервалі $-\infty < t < +\infty$ може бути представлений інтегральним перетворення Фур'є:

$$X(\omega) = \int_0^{\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (2.21)$$

Отже, частотний спектр неперіодичного сигналу є неперервним.

Контрольні запитання.

1. За якими ознаками проводиться класифікація сигналів? Які сигнали називають неперервними і дискретними, імпульсними та цифровими, детермінованими і випадковими, елементарними і складними?
2. Опишіть походження і властивості завад.
3. Аналітичне і графічне вираження елементарних сигналів.
4. Аналітичне вираження складних сигналів Фур'є. Тригонометрична і показникова форма ряду Фур'є.
5. Аналітичне вираження дискретного сигналу.
6. Аналітичне вираження сигналу у цифровій системі автоматичного керування.

§ 3 Випадкові сигнали, їх математичний опис і числові характеристики.

3.1. Математичний опис випадкового сигналу як випадкової функції часу.

Канали зв'язку, по яких передаються сигнали інформації, знаходяться в оточуючому середовищі, яке заповнене джерелами електромагнітних збурень – електродвигунами, генераторами, зварювальними апаратами, лініями електропередач, телевізорами, рентген-апаратами і т.п. Всі ці джерела випромінюють у простір електромагнітну енергію широкої смуги частот і різної інтенсивності. По закону електромагнітної індукції в каналах зв'язку наводяться сигнали завад, які складаються з корисними сигналами інформації, спотворюють їх форму, амплітуду і інші інформативні параметри. В цьому випадку кожний параметр сигналу є випадковою функцією часу і координат простору.

Для спрощення задачі будемо розглядати випадковий сигнал в одній визначеній точці простору. Математичною моделлю такого сигналу є випадкова

функція часу $X(t)$.

Випадковою функцією називається функція, яка в результаті досліду може прийняти той чи інший конкретний вид, заздалегідь невизначено, який саме

реалізація випадкової функції – конкретний вид, який має випадкова функція в результаті досліду.

Наприклад, випадковою функцією є сигнал у лінії зв'язку, якщо вона проходить біля лінії електромережі, навантаженням якої є багато асинхронних двигунів, зварювальних апаратів тощо. Конкретні реалізації випадкових сигналів, наприклад, можуть мати вид, зображений на рис. 3.1.

Розглянемо деяку випадкову функцію $X(t)$, над якою здійснено n незалежних дослідів і отримано n реалізацій – $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$, ..., $x_n(t)$. Кожна реалізація вже є не випадковою функцією. Розглянемо випадкову функцію в деякий фіксований момент часу t_1 . Очевидно, що вона перетворюється у випадкову величину, яка може прийняти значення x_1 , x_2 , x_3 , ..., x_n . Домовимося назвати цю випадкову величину перетином випадкових функцій.

Отже, ми впевнились, що випадкова функція об'єднує в собі властивості випадкової величини і функції. При фіксованому значенні аргументу вона перетворюється на звичайну випадкову величину, в результаті кожного досліду вона перетворюється у звичайну функцію.

Якщо через випадкову функцію зробити декілька перетинів в момент часу t_1 , t_2 , t_3 , ..., t_m , то її можна записати і розглядати як систему m випадкових величин.

$$X(t_1), X(t_2), X(t_3), \dots X(t_m) \quad (3.1)$$

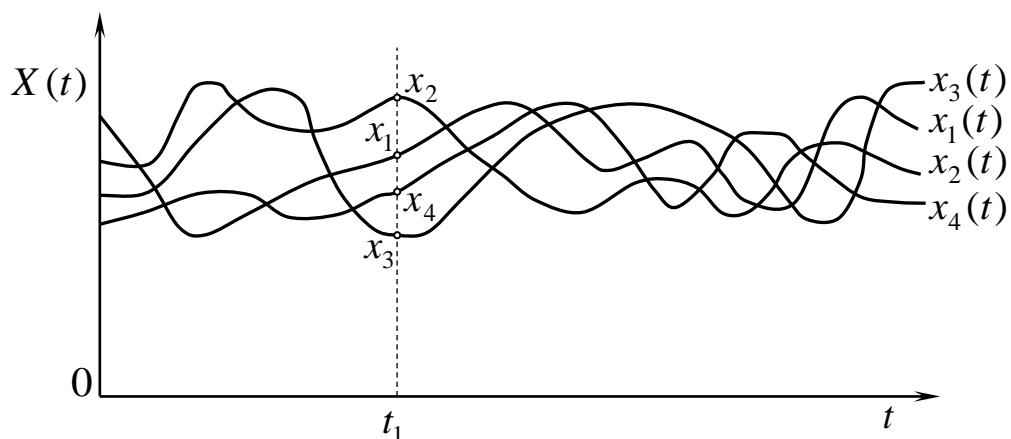


Рис. 3.1. Реалізації випадкової функції

Таким чином, вивчення випадкової функції можна замінити вивченням систем випадкових величин. Чим більше число m , тим точнішою буде така заміна. З теорії ймовірностей відомо, що випадкова величина повністю характеризується законом розподілу ймовірностей, який ставить у відповідність значення випадкової величини і ймовірність появи цього значення. Закон розподілу одної випадкової величини – функція одного аргументу, закон розподілу системи

двох випадкових величин – функція двох аргументів, системи m випадкових величин – функція m -аргументів, вивчення законів розподілу ймовірностей можна замінити вивченням числових характеристик випадкових функцій. На відміну від числових характеристик випадкових величин, які є визначеними числами, характеристиками випадкових функцій є в загальному випадку, не числа, а функції.

Розглянемо кілька перетинів випадкової функції $X(t_1)$, $X(t_2)$, $X(t_3)$. В кожному перетині маємо звичайну випадкову величину, обчислимо математичне сподівання $m_x(t_1)$, $m_x(t_2)$, $m_x(t_3)$ і т.д. В загальному випадку $m_x(t)$ є функція t .

$$m_x(t) = M[X(t)] \quad (3.2)$$

Математичним сподіванням випадкової функції $X(t)$ називається не випадкова функція $m_x(t)$, яка при кожному значенні аргументу t дорівнює математичному сподіванню відповідного перетину випадкової функції.

Математичне сподівання випадкової функції можна трактувати як деяку усереднену визначену функцію, біля якої варіюють конкретні реалізації випадкової функції.

Дисперсією D випадкової функції $X(t)$ називається не випадкова функція значення якої для кожного t дорівнює дисперсії відповідного перетину випадкової функції.

$$D_x(t) = D[X(t)] \quad (3.3)$$

Дисперсія випадкової функції при кожному t характеризує відхилення можливих реалізацій випадкової функції відносно середнього значення. Математичне сподівання і дисперсія є важливими характеристиками випадкової функції, але вони повністю не характеризують усі властивості випадкових функцій.

Якщо розглянути дві випадкові функції $X_1(t)$ і $X_2(t)$, зображені на рис. 3.2, то при однакових $m_x(t)$ і $D_x(t)$ вони мають різну внутрішню структуру, яка не знайшла відображення ні в математичному сподіванні, ні в дисперсії. Отже, для її опису потрібно ввести спеціальну характеристику. Цю характеристику називають кореляційною функцією, або автокореляційною функцією. Автокореляційна функція

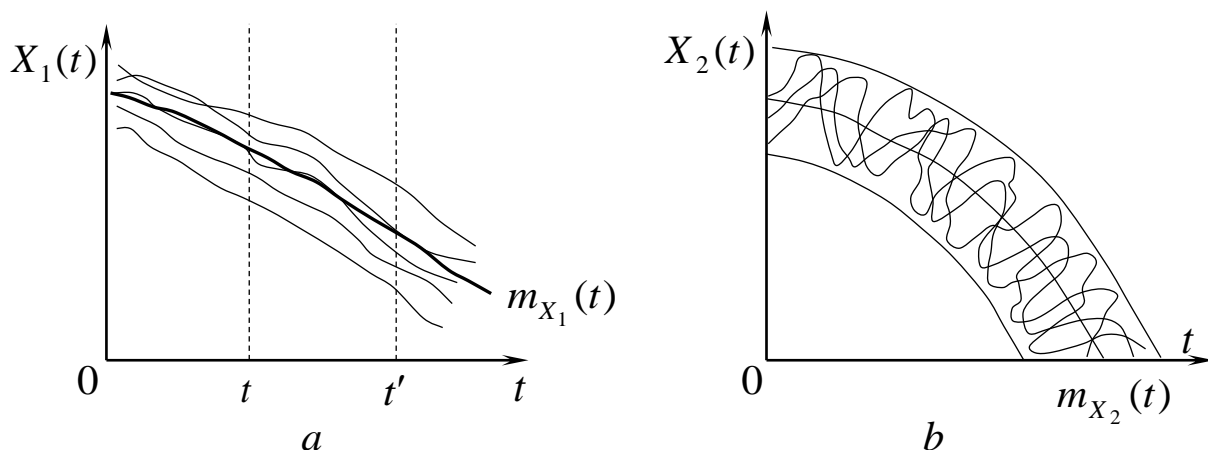


Рис. 3.2. Реалізації двох випадкових функцій з різними властивостями

визначає степінь залежності між перетинами випадкової функції в різних точках t .

Розглянемо два перетини випадкової функції $X_1(t)$ на рис. 3.2а, $X(t)$ і $X(t')$. Якщо значення t і t' знаходяться близько один від одного, то дві випадкові величини $X(t)$ і $X(t')$ можуть бути тісно пов'язані між собою. Якщо величина $X(t)$ прийняла певне значення, то величина $X(t')$ прийме близьке до нього значення. Якщо ж інтервал між перетинами зростає, залежність між величинами зменшується. Степінь залежності величин $X(t)$ і $X(t')$ оцінюється кореляційним моментом. Кореляційний момент є функцією двох аргументів t і t' . Ця функція і називається **кореляційною функцією**.

Кореляційною функцією випадкової функції $X(t)$ називається не випадкова функція двох аргументів $K_x(t, t')$, яка при кожній парі значень t, t' дорівнює кореляційному моменту відповідних перетинів випадкової функції

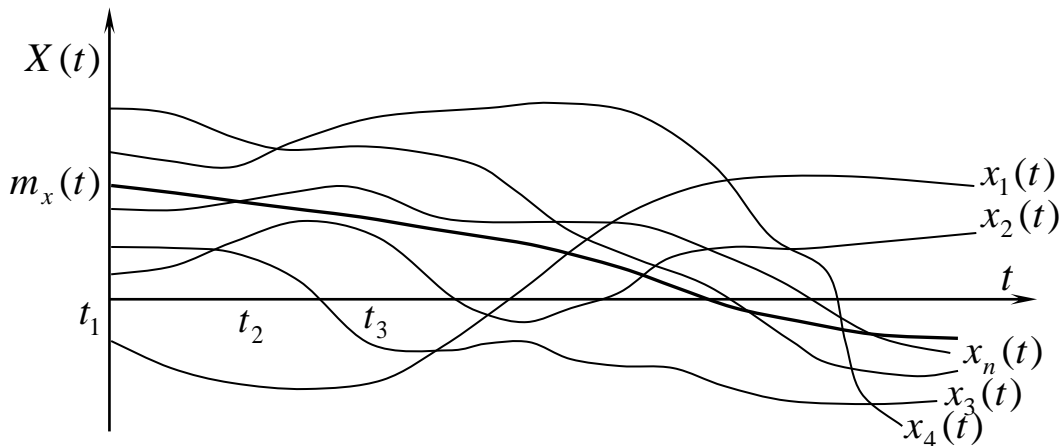


Рис. 3.3. Реалізації випадкової функції, отримані при дослідях.

$$K_x(t, t') = M[\dot{x}(t)\dot{x}(t')], \quad (3.4)$$

де $\dot{X}(t) = X(t) - m_x(t)$; $\dot{X}(t') = X(t') - m_x(t')$

Якщо аргументи випадкової функції співпадають, тобто $t = t'$ то згідно з (3.4)

$$K_x(t, t') = M\{[\dot{X}(t) - m_x(t)]^2\} = D_x(t) \quad (3.5)$$

При $t = t'$ кореляційна функція перетворюється в дисперсію випадкової функції. Це говорить про те, що необхідність в дисперсії, як в окремій характеристиці випадкової функції відпадає. За основні характеристики випадкової функції достатньо вважати математичне сподівання і кореляційну функцію. Замість кореляційної функції користуються також нормованою кореляційною функцією,

$$r_x(t, t') = \frac{K_x(t, t')}{\sigma_x(t)\sigma_x(t')}. \quad (3.6)$$

3.2. Обчислення характеристик випадкового сигналу за результатами експерименту.

Нехай над випадковою функцією $X(t)$ здійснено n незалежних дослідів і отримано n реалізацій випадкової функції. Потрібно знайти оцінки характеристик випадкових функцій – математичного сподівання $m_x(t)$, дисперсії $D_x(t)$ і кореляційної функції $K_x(t, t')$. Для цього розглянемо ряд перетинів випадкової функції для моментів часу $t_1, t_2, t_3, \dots, t_m$ і напишемо значення, які прийняла функція $X(t)$ в ці моменти часу. Кожному з моментів будуть відповідати n значень випадкової величини. Значення інтервалу Δt обирається постійним, таким, щоб по вибраних точках можна було відновити криві реалізацій. Значення дослідних даних заносяться у таблицю, кожен рядок якої відповідає певній реалізації, а число стовпчиків дорівнює числу значень аргументу.

Таблиця 3.1.

$X(t)$ \ t	$t_1,$	$t_2,$	$t_3,$	...	t_m
$x_1(t)$	$x_1(t_1)$	$x_1(t_2)$	$x_1(t_3)$	...	$x_1(t_m)$
$x_2(t)$	$x_2(t_1)$	$x_2(t_2)$	$x_2(t_3)$	...	$x_2(t_m)$
...
$x_n(t)$	$x_n(t_1)$	$x_n(t_2)$	$x_n(t_3)$	...	$x_n(t_m)$

n – число дослідів, реалізацій випадкової функції; m – число перетинів.

Далі знаходимо оцінки математичних сподівань для кожного значення аргументу

$$\begin{aligned} \tilde{m}_x(t_1) &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i(t_1)}{n}; \\ \tilde{m}_x(t_2) &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i(t_2)}{n}; \\ &\dots\dots\dots \\ \tilde{m}_x(t_m) &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i(t_m)}{n}. \end{aligned} \tag{3.7}$$

Дисперсій

$$\tilde{D}_x(t_k) = \frac{\sum_{i=1}^n [x_i(t_k) - \tilde{m}_x(t_k)]^2}{n-1}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, m. \tag{3.8}$$

Кореляційних моментів

$$K_x(t_k t_l) = \frac{\sum_{i=1}^n [x_i(t_k) - \tilde{m}_x(t_k)][x_i(t_l) - \tilde{m}_x(t_l)]}{n-1}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, m; \quad (3.9)$$

$$l = 1, 2, 3, \dots, m; \quad l \neq k$$

Після обчислення характеристик можна побудувати графіки $\tilde{m}_x(t)$, $\tilde{D}_x(t)$

3.3. Стаціонарні та ергодичні випадкові процеси.

На практиці є багато випадкових процесів, які нагадують коливання з випадковою амплітудою і частотою з незначним відхиленням від деякого середнього значення. Наприклад, коливання напруги в електромережі, сигнали шуму на виході радіоприймача, тощо. За своїми властивостями і математичному опису стаціонарні випадкові процеси значно простіші за нестаціонарні, тому що всі ймовірнісні характеристики стаціонарної функції не залежать від точки перетину.

Для стаціонарного процесу

$$m_x(t) = m_x = const; \quad (3.10)$$

$$D_x(t) = D_x = const; \quad (3.11)$$

$$K_x(t, t + \tau) = K_x(\tau). \quad (3.12)$$

Отже, кореляційна функція стаціонарного випадкового процесу є функцією не двох, а одного аргументу. Ця властивість у багатьох випадках значно спрощує аналіз випадкових процесів. Умова (3.9) при $\tau = 0$ відповідає (3.8), тобто $D_x(t) = K_x(t, t) = K_x(0) = const$.

Виходячи з цього, можна стверджувати, що

стаціонарна випадкова функція – це така випадкова функція, кореляційна функція якої залежить тільки від інтервалу τ між двома перетинами.

Однією з властивостей кореляційної функції є її симетричність, тобто

$$K_x(t, t') = K_x(t', t). \quad (3.13)$$

Для стаціонарного процесу

$$K_x(\tau) = K_x(-\tau), \quad (3.14)$$

тобто, кореляційна функція є парною функцією свого аргументу. Тому кореляційну функцію визначають тільки для додатного значення аргументу. Користуються на практиці нормованою кореляційною функцією

$$\rho_x(\tau) = \frac{K_x(\tau)}{D_x}. \quad (3.15)$$

Функція $\rho_x(\tau)$ є не що інше як коефіцієнт кореляції між перетинами випадкової функції.

Ергодичним називається випадковий процес, у якого числові характеристики за множиною реалізацій з ймовірністю наближеною до 1 сходяться до числових характеристик одної реалізації на тривалому інтервалі часу.

Отже, обчислення числових характеристик ергодичного процесу можна здійснювати за однією реалізацією достатньої тривалості.

Контрольні запитання

1. Властивості випадкових сигналів та їх числові характеристики.
2. Математичне сподівання випадкового сигналу. Як обчислити математичне сподівання?
3. Дисперсія випадкового сигналу та її обчислення.
4. Кореляційна функція кореляційного сигналу та її обчислення.
5. Який випадковий процес називається стаціонарним, який ергодичним? Властивості цих випадкових процесів.

§ 4 Спектральний аналіз стаціонарного випадкового сигналу.

4.1. Кореляційна функція стаціонарного випадкового процесу.

В реальних умовах більшість об'єктів керування працюють в умовах стаціонарних випадкових збурень. Особливо це стосується рухомих об'єктів керування – літаків, ракет, торпед, снарядів тощо.

Для системи керування такими об'єктами дуже важливою характеристикою є похибка керування, тобто відхилення від заданих координат. При збуреннях, які є

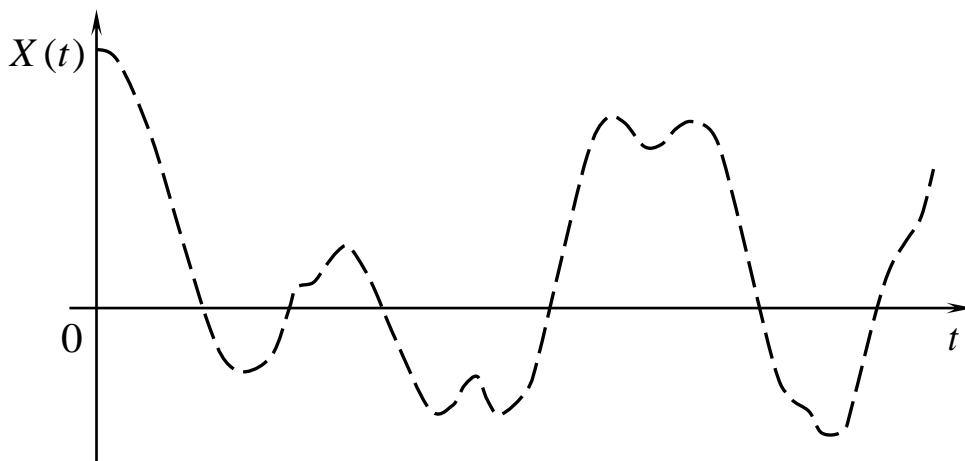


Рис. 4.1. Стаціонарний випадковий процес

випадковими процесами, ця похибка характеризується дисперсією випадкової функції, якою описується кожна вихідна координата. Отже, при проектуванні системи потрібно розв'язувати задачу мінімізації похибки в умовах дії випадкових завад. Ця задача вирішується методами спектральної теорії стаціонарних випадкових процесів, яку ми коротко розглянемо.

Як ми вже впевнилися, випадковий процес нагадує коливальний процес з випадковими амплітудами і періодами. В залежності від того, які частоти і амплітуди в складі випадкового процесу переважають, він має ту чи іншу кореляційну функцію.

Виходячи з того, можна стверджувати, що кореляційна функція випадкового процесу залежить від її спектрального складу. На відміну від детермінованих функцій, амплітуди коливань випадкових функцій будуть випадковими величинами. Спектр випадкової функції буде описувати розподіл дисперсій по різним частотам.

Розглянемо стаціонарну випадкову функцію $X(t)$ і її кореляційну функцію на інтервалі $0, T$, рис. 4.1 і 4.2.

$$\dot{X}(t) = X(t) - m_x(t), \quad (4.1)$$

де $\dot{X}(t)$ – так звана центрована випадкова функція.

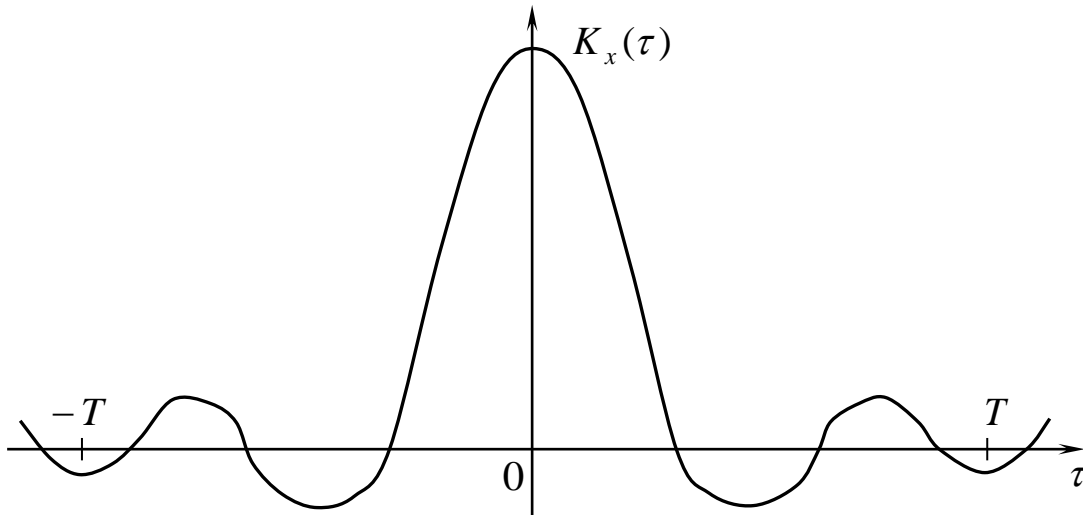


Рис. 4.2. Кореляційна функція стаціонарного процесу

Математичне сподівання ЦВФ тотожно дорівнює нулю, а її кореляційна функція

$$K_x(t, t') = M[\dot{X}(t)\dot{X}(t')] = K_x(t, t') \quad (4.2)$$

Якщо $t' = t + \tau$, то $K_x(t, t + \tau) = K_x(\tau)$.

Як ми впевнилися раніше, функція $K_x(t)$ є парною, $K_x(\tau) = K_x(-\tau)$ і її зображенням є симетрична крива, зображена на рис. 4.2

Відомо, що парну функцію на інтервалі $(-T, T)$ можна розкласти в ряд Фур'є по парних гармоніках.

$$K_x(\tau) = \sum_{K=0}^{\infty} D_K \cos \omega_K \tau, \quad (4.3)$$

де $\omega_K = K\omega_1$; $\omega_1 = \frac{\pi}{T}$, а

$$D_0 = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T K_x(\tau) d\tau; \quad D_K = \frac{1}{T} \int_{-T}^T K_x(\tau) \cos \omega_K \tau d\tau; \quad K \neq 0 \quad (4.4)$$

Для парних функцій (4.4) можна перетворити на формули

$$D_0 = \frac{1}{T} \int_0^T K_x(\tau) d\tau; \quad (4.5)$$

$$D_K = \frac{2}{T} \int_0^T K_x(\tau) \cos \omega_K \tau d\tau; \quad K \neq 0$$

Якщо в (4.3) зробити заміну $\cos \omega_K \tau = \cos \omega_K (t' - t)$, де $\cos \omega_K (t' - t) = \cos \omega_K t' \cdot \cos \omega_K t + \sin \omega_K t' \sin \omega_K t$, то отримаємо

$$K_x(t, t') = \sum_{K=0}^{\infty} (D_K \cos \omega_K t' \cdot \cos \omega_K t + D_K \sin \omega_K t' \sin \omega_K t) \quad (4.6)$$

Формула (4.6) називається канонічним розкладом кореляційної функції.

За канонічним розкладом кореляційної функції можна побудувати канонічний розклад випадкової функції з тими ж координатними функціями і з дисперсіями D_K . Координатними функціями даного канонічного розкладу є функції $\cos \omega_K t$, $\sin \omega_K t$, $K = 0, 1, 2$. Дисперсії D_K визначаються за формулами (4.4). Отже, ми отримали не що інше, як спектральний розклад стаціонарної випадкової функції, який зображує випадкову функцію розкладеною на гармонічні коливання різних частот, амплітуди цих коливань є випадковими величинами.

Визначимо дисперсію випадкової функції $\dot{X}(t)$, якщо вона задана спектральним розкладом

$$K_x(t, t') = \sum_{K=0}^{\infty} (D_K \cos \omega_K t' \cdot \cos \omega_K t + D_K \sin \omega_K t' \sin \omega_K t) \quad (4.7)$$

$$D[U_K] = D[V_K] = D_K,$$

$$D_x = D[\dot{X}(t)] = \sum_{K=0}^{\infty} D_K (\cos^2 \omega_K t + \sin^2 \omega_K t) = \sum_{K=0}^{\infty} D_K \quad (4.8)$$

Отже, дисперсія стаціонарної випадкової функції дорівнює сумі дисперсій всіх гармонік її спектрального розкладу.

4.2. Спектральна щільність стаціонарного випадкового процесу.

Розглядаючи стаціонарну випадкову функцію на обмеженому інтервалі часу $(0, T)$ та $(-T, 0)$, ми отримали переривчастий або лінійчатий спектр. Розглянемо тепер цю функцію на більшому інтервалі. Нехай $T \rightarrow \infty$, тоді $\omega_1 = \frac{2\pi}{2T} \rightarrow 0$. Відстані між частотами ω_K будуть необмежено зменшуватись, а дискретний спектр буде наближатися до неперервного. При цьому дискретна функція $D_K(\omega)$ буде

наближатися до неперервної функції $S_K(\omega)$, а площа обмежена кривою $S_K(\omega)$ повинна дорівнювати дисперсії D_x випадкової функції $\dot{X}(t)$.

$$D_x = \int_0^{\infty} S_x(\omega) d\omega. \quad (4.9)$$

Функція $S_x(\omega)$ називається спектральною щільністю (густиною) дисперсії стаціонарної випадкової функції $\dot{X}(t)$. Згідно з (4.6) ординати дискретного спектру D_K можна виразити через кореляційну функцію $K_x(\tau)$. Спектральна щільність також може бути виражена через кореляційну функцію

$$K_x(\tau) = \int_0^{\infty} S_x(\omega) \cos \omega \tau d\omega. \quad (4.10)$$

Вираз (4.10) є не що інше, як інтеграл Фур'є. Інтеграл Фур'є є узагальненням розкладу в ряд Фур'є неперіодичної функції на нескінченному інтервалі і є розкладом функції на суму елементарних гармонічних коливань з неперервним спектром.

$$S_x(\omega) = \frac{2}{T} \int_0^{\infty} K_x(\tau) \cos \omega \tau d\tau. \quad (4.11)$$

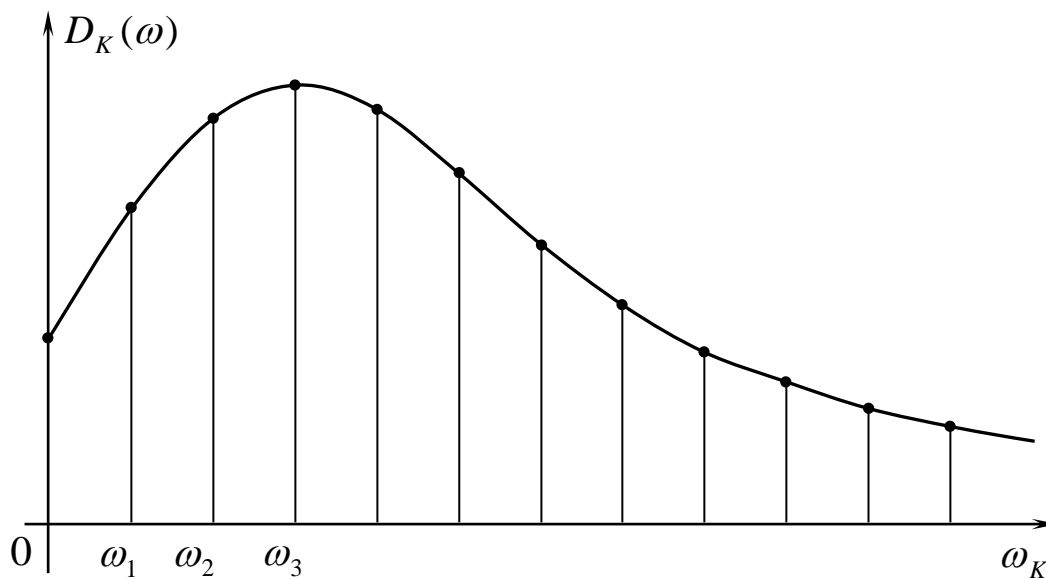


Рис. 4.3. Спектр дисперсій стаціонарної випадкової функції на інтервалі $(-T, T)$.

Формула (4.11) називається зворотним перетворенням Фур'є. Обидві ці формули носять назву перетворень Фур'є і застосовуються при аналізі систем автоматичного керування, на входи яких надходять сигнали випадкових процесів. При аналізі лінійної системи керування, на вхід якої діє збурення у виді стаціонарного випадкового сигналу вирішення задачі зводиться до знаходження спектральної

щільності вхідного сигналу. Вихідний сигнал знаходиться як добуток $S(x)$ на квадрат амплітудно-частотної характеристики.

Контрольні запитання.

1. Властивості кореляційної функції стаціонарного процесу.
2. Поясніть поняття спектрального розкладу стаціонарного процесу.
3. Спектральна щільність стаціонарного процесу.

§ 5 Перетворення сигналів інформації.

5.1. Поняття модуляції сигналу. Види модуляції.

Первинні сигнали електрозв'язку в діапазоні звукових частот можуть передаватись на відстань, обмежену довжиною двопроводної лінії. Безпосередня передача їх радіосигналами звукових і ультразвукових частот (до 100 КГц) є неефективною, бо вони мають високий коефіцієнт згасання і далеко не розповсюджуються. Для того, щоб сигнали звукового мовлення і телебачення можна було ефективно передавати електромагнітним полем, їх потрібно перенести в діапазон високих частот. Для сигналу звукового мовлення нижня межа цього діапазону становить 100 КГц , для сигналу телевізійного – 30 МГц . Це перенесення здійснюється накладанням первинного сигналу на допоміжне колювання – носій.

Модуляція – процес накладання сигналу низької частоти на колювання-носій високої частоти.

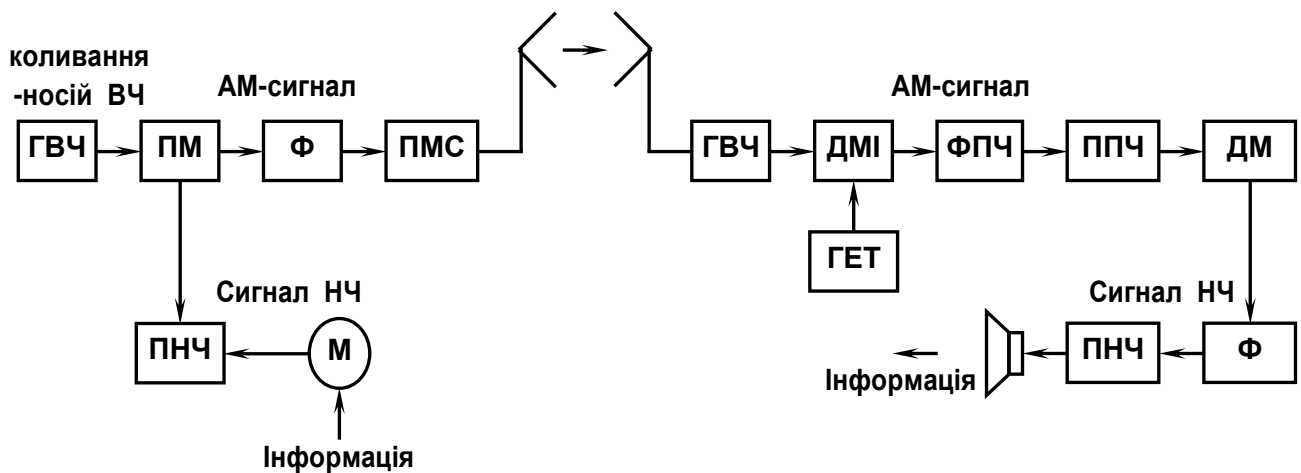


Рис. 5.1. Блок-схема АМ-каналу радіозв'язку.

М – мікрофон; **ПНЧ** – підсилювач НЧ; **ГВЧ** – генератор ВЧ; **ПМ** – підсилювач-модулятор; **Ф** – фільтр; **ПМС** – підсилювач модульованого сигналу; **ГВЧ** – підсилювач сигналів ВЧ; **ДМІ** – демодулятор проміжної частоти; **ГЕТ** – генератор-гетеродин; **ФПЧ** – фільтр проміжної частоти; **ППЧ** – підсилювач ПЧ; **ДМ** – демодулятор; **Ф** – фільтр; **ПНЧ** – підсилювач НЧ.

При модуляції один з параметрів коливання-носія змінюється за законом зміни інформативного параметру модулюючого сигналу. В результаті модуляції модульоване коливання стає сигналом інформації з властивостями коливання-носія. Найчастіше за коливання-носії використовують гармонічне коливання високої частоти. **Це коливання має три параметри, які можна змінювати у процесі модуляції за законом зміни інформативного сигналу – амплітуду, частоту і фазу коливання.** Відповідно до цього, при передаванні інформації гармонічним коливанням-носієм застосовують амплітудну модуляцію (**АМ**), частотну модуляцію (**ЧМ**) і фазову модуляцію (**ФМ**). Останні два види модуляції належать до кутової модуляції. В імпульсних системах допоміжним коливанням-носієм є періодична послідовність імпульсів.

При модуляції імпульсного коливання за законом інформативного сигналу можна змінювати амплітуду імпульсів, їх частоту, їх тривалість або ширину. Відповідно до цього маємо такі види імпульсної модуляції:

- амплітудноімпульсну модуляцію (**АІМ**);
- частотно-імпульсну модуляцію (**ЧІМ**);
- широтно-імпульсну модуляцію (**ШІМ**).

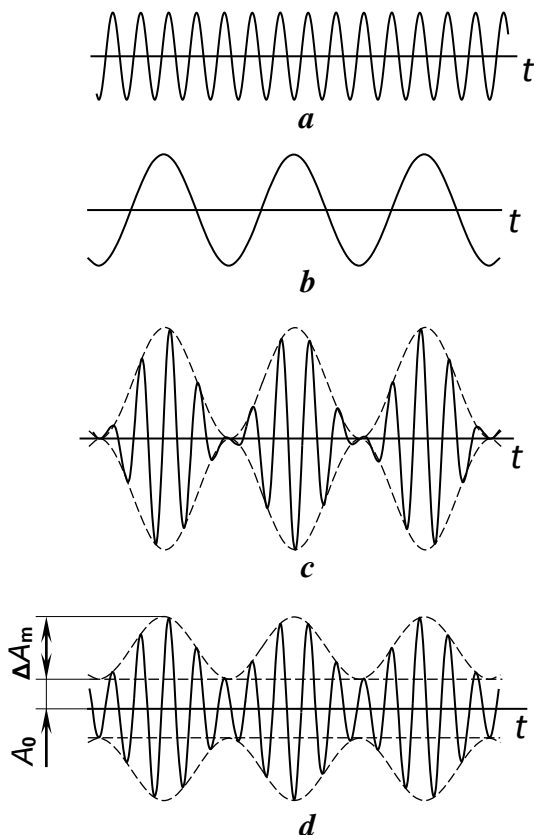


Рис. 5.2. Коливання-носії і сигнали при амплітудній модуляції.

- a* – коливання-носії високої частоти;
- b* – модулюючий сигнал звукової частоти;
- c* – модулюючий сигнал з коефіцієнтом модуляції 1;
- d* – модульований сигнал з коефіцієнтом модуляції 0,5.

Крім цих трьох існує ще оди вид модуляції імпульсів – імпульсно-кодова модуляція (**ІКМ**). Цей вид модуляції полягає у тому, що за законом інформативного параметру змінюється амплітуда імпульсів, а її значення дискретизується за рівнем, тобто подається дискретним рядом чисел, які передаються кодовими комбінаціями і у певному коді представляють ти чи інше десяткове число. Найпростішим кодом є одиничний або число-імпульсний код, при якому десяткове число передають тим самим числом імпульсів. Далі за допомогою перетворювача коду одиничний код легко перетворити у двійковий або двійково-десятковий. Ці операції розглянуто у параграфі 6.

Амплітудна і частотна модуляції застосовуються у радіомовленні і телебаченні, радіо та телефонному зв'язку. Всі види імпульсної модуляції застосовуються в радіолокації, радіотелеметрії, передачі інформації з супутників та керуванні рухомими об'єктами.

Амплітудна модуляція. Схема передачі і приймання АМ сигналів радіозв'язку наведена на рис. 5.1. за цією схемою здійснюється наступне. Звукова інформація мікрофоном **М** перетворюється в сигнал електричного струму. У найпростішому випадку цей сигнал має форму, показану на рис. 5.2, *b*. Це гармонічний синусоїдний сигнал, аналітичний вираз якого має вигляд:

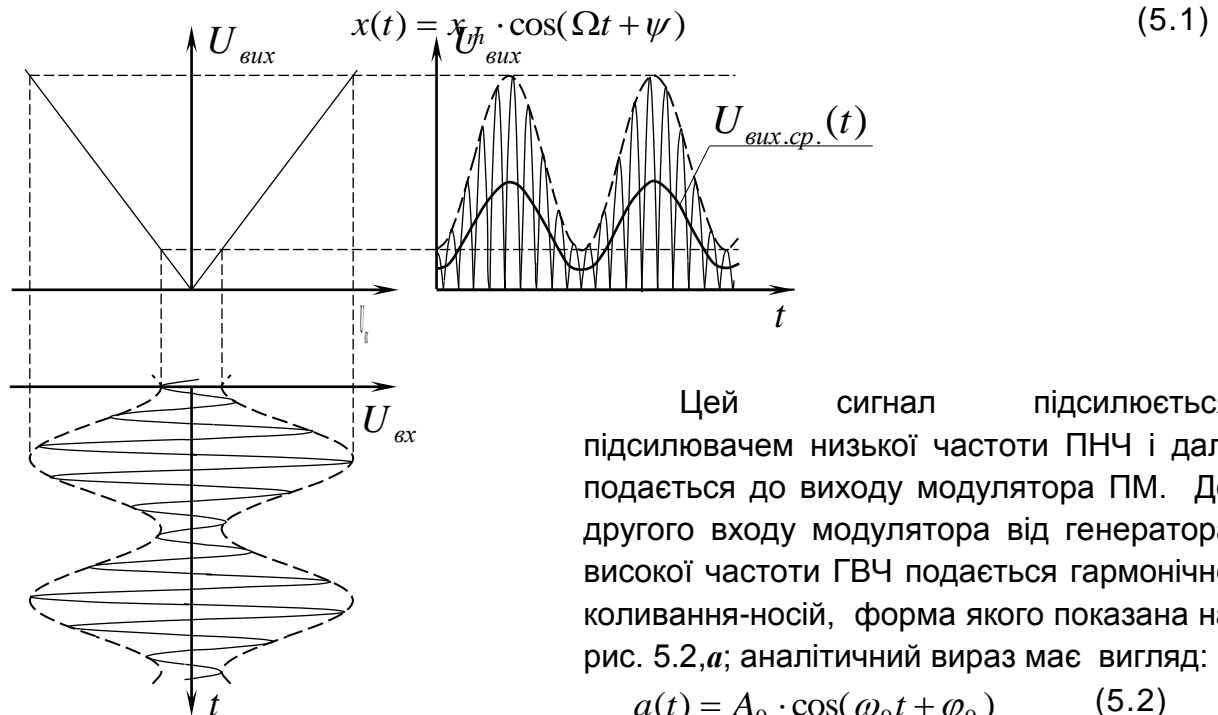


Рис. 5.3. Форма сигналів на вході і виході демодулятора.

Цей сигнал підсилюється підсилювачем низької частоти ПНЧ і далі подається до виходу модулятора ПМ. До другого входу модулятора від генератора високої частоти ГВЧ подається гармонічне коливання-носії, форма якого показана на рис. 5.2, *a*; аналітичний вираз має вигляд:

$$a(t) = A_0 \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (5.2)$$

Модулятор – це пристрій з нелінійною характеристикою, у якому виконується операція перемноження двох сигналів.

При модуляції амплітуда коливання-

переносника змінюється за законом:

$$A_m = A_0 [1 + m_{AM} \cdot x(t)], \quad (5.3)$$

де m_{AM} – коефіцієнт амплітудної модуляції

$$m_{AM} = \frac{2x_m}{A_0} = \frac{\Delta A_m}{A_0}. \quad (5.4)$$

На виході модулятора отримуємо сигнал:

$$a'(t) = A_0 (\cos \omega_0 t + \varphi_0) [1 + m_{AM} \cdot x(t)]. \quad (5.5)$$

Аналітичний вираз модульованого сигналу розглянемо для спрощеного випадку, в якому: $\varphi_0 = 0$; $\psi = 0$; $x_m = 1$.

$$a'(t) = A_0 \cos \omega_0 t \cdot [1 + m_{AM} \cos \Omega t] = A_0 \cos \omega_0 t + m_{AM} A_0 \cos \omega_0 t \cos \Omega t \quad (5.6)$$

Відомо з тригонометрії, що

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

тому

$$a'(t) = A_0 \cos \omega_0 t \cdot [1 + m_{AM} \cos \Omega t] = A_0 \cos \omega_0 t + m_{AM} A_0 \cos \omega_0 t \cos \Omega t \quad (5.7)$$

Отже, в найпростішому випадку модульований сигнал є складним сигналом, який розкладається на три складових. Перша складова – гармонічне коливання з частотою переносника ω_0 , друга складова – гармонічне коливання з частотою $\omega_0 + \Omega$ і третя складова – гармонічне коливання з частотою $\omega_0 - \Omega$. Частоти другої і третьої складових називаються бічними частотами – верхня бічна і нижня бічна.

Розглянутий найпростіший випадок амплітудної модуляції застосовується у радіотелеграфії. Синусоїдний сигнал одного тону (когерентний сигнал) частотою 1000 Гц маніпулюється телеграфним ключем кодом Морзе. Цей маніпульований сигнал звукової частоти модулює коливання високої частоти, які підсилюються радіопередавачем і через антену випромінюються у «ефір».

Якщо модулюючим сигналом є сигнал звукового мовлення з частотним спектром $50 \dots 10000 \text{ Гц}$, то в результаті амплітудної модуляції отримуємо смуги бічних частот–смугу нижніх бічних частот $\omega_0 - \Delta\Omega$ і смугу верхніх бічних частот $\omega_0 + \Delta\Omega$.

Властивість симетрії спектру АМ-сигналу дозволяє здійснити так звану одно смугову АМ, при якій передається тільки одна бокова смуга частот. Друга бокова смуга і частота-носії затримуються за допомогою фільтра.

Після передачі АМ-сигналу по каналу зв'язку необхідно здійснити його демодуляцію, тобто виділити з спектру прийнятого АМ-сигналу модулюючий сигнал $x(t)$. Ця операція виконується у радіоприймачі за допомогою демодулятора (детектора). Детектор є нелінійним елементом, який періодичну синусоїдну функцію перетворює в періодичну несинусоїдну, спектр якої складається з гармонік і сигналів бічних частот. За допомогою фільтра виділяється модулюючий сигнал, а високочастотні сигнали затримуються фільтром НЧ. Форма демодульованого сигналу при двотактовому детектуванні зображена на рис. 5.3.

Згідно з викладеним вище, несинусоїдний періодичний сигнал складається із складових, серед яких присутні складова з частотою сигналу-носія ω_0 , з частотами $\omega_0 - \Omega$, $\omega_0 + \Omega$, складова з частотою модулюючого сигналу Ω , а також інші гармоніки носія $2k\omega_0$ і складові з частотами-супутниками $2k\omega_0 \pm \Omega$. Модулюючий сигнал виділяється за допомогою фільтра нижніх частот.

Амплітудну модуляцію можна реалізувати за допомогою пристрою з нелінійною характеристикою, наприклад, операційними підсилювачем з керованим коефіцієнтом підсилення, або за допомогою нелінійного елемента – діода, транзистора, тощо.

Частотна модуляція. При частотній модуляції амплітудна коливання-носія залишається незмінною, а частота змінється за законом зміни амплітуди модулюючого сигналу. В результаті модуляції отримують модульований сигнал незмінної амплітуди і змінної частоти. Форма сигналів процесу частотної модуляції показана на рис. 5.4.

Якщо коливання-носії аналітично виражене формулою (5.1), а модулюючий сигнал є тим самим, що й при амплітудній модуляції, тобто $x(t) = \cos \Omega t$, то в

результаті частотної модуляції отримаємо сигнал, аналітичний вираз якого можна подати формулою:

$$a'(t) = A_m \cos(\omega_0 + \Delta\omega)t \cos \Omega t, \quad (5.8)$$

де $\Delta\omega$ – максимальна девіація частоти,

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t, \quad (5.9)$$

ω – частота модульованого сигналу в довільний момент процесу модуляції.

Девіація частоти – відхилення частоти модульованого сигналу від несучої частоти коливання-носія, що пропорційне до миттєвих значень рівня модульованого сигналу.

$$F_{\text{дев}} = F_{\text{max}} - F_{\text{нес}}, \quad (5.10)$$

де $F_{\text{дев}}$ – девіація частоти;

F_{max} – максимальна частота;

$F_{\text{нес}}$ – несуча частота.

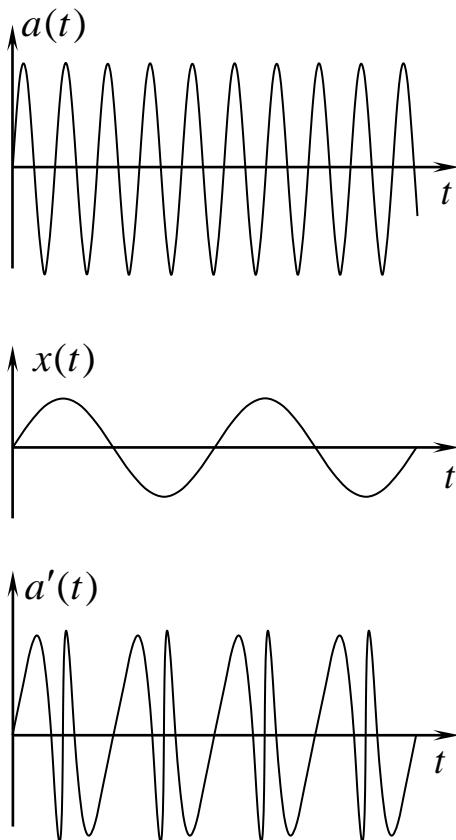


Рис. 5.4. Форма сигналів при частотній модуляції.

$a(t)$ – коливання-носії (несуча частота);

$x(t)$ – модулюючий сигнал;

$a'(t)$ – модульований сигнал.

Індекс частотної маніпуляції – відношення девіації частоти до частоти модулюючого сигналу.

Максимальна девіація частоти відповідає амплітуді модулюючого сигналу. Девіація теоретично не обмежена, але в практиці радіомовлення її значення пов'язане з спектром сигналів, які передаються та якістю відтворення звукового сигналу. Для забезпечення високої якості музичних передач стандартом встановлено значення максимальної девіації для ультракороткохвильових радіостанцій:

$$\Delta f = \pm 75 \text{ КГц}$$

Розкладаючи вираз (5.8) на складові за правилами тригонометрії, отримаємо не дві складові з бічними частотами $f_0 + f_m$ та $f_0 - f_m$, як при амплітудній модуляції, а багато складових з бічними частотами $f_0 + f_m$, $f_0 + 2f_m$, $f_0 + 3f_m$, ... , та $f_0 - f_m$, $f_0 - 2f_m$, $f_0 - 3f_m$, ... тощо, де f_0 – циклічна частота коливання-носія (несуча частота), f_m – циклічна частота модулюючого сигналу.

Теоретично спектр частот ЧМ сигналу є нескінченним, але амплітуди складових з бічними частотами зменшуються із зростанням відстані бічної частоти від несучої. Потужність частотно-модульованого сигналу незмінна і розподіляється по бічних частотах.

Коефіцієнт модуляції при ЧМ визначається відношенням $m_{чм} = \frac{\Delta f}{f_m}$.

Смуга частот сигналу, яку потрібно передавати, пов'язана з максимальною частотою сигналу і коефіцієнт модуляції функцією Бесселя.

У практиці радіомовлення з частотною модуляцією найвищою частотою модулюючого сигналу є частота 15 КГц , девіація частоти $\pm 75 \text{ КГц}$, коефіцієнт модуляції дорівнює 5.

Значення смуги частот, які повинні ефективно передавати (без втрати потужності), обчислене через функцію Бесселя, дорівнює 240 КГц . Така смуга частот теоретично необхідна для передачі повної інтенсивності сигналу 15 КГц . Але практика показала, що для високоякісного відтворення сигналу можна цю смугу звужити до 200 КГц . Якщо ж застосувати передачу в ефір тільки однієї смуги бічних частот, то від 200 КГц можна перейти до 100 КГц . Тому частотну модуляцію доцільно застосовувати починаючи з діапазону ультракоротких (метрових) хвиль, тобто від частот 30 КГц .

Аналіз математичної моделі процесу ЧМ показує, що навіть при найпростішій синусоїдній формі модулюючого сигналу спектр ЧМ-сигналу є безмежно широким, лінійчатим, відстань між спектральними лініями дорівнює Ω , амплітуда кожної складової залежить від коефіцієнта $m_{чм}$ і відстані складової від ω_0 , тобто визначається номером гармоніки, частотний спектр симетричний відносно ω_0 .

Внаслідок того, що спектр ЧМ-сигналу в декілька разів ширший а спектр АМ-сигналу, радіозв'язок з ЧМ можливий тільки на УКВ-хвилях, надвисоких частотах, на волоконно-опричних лініях. Перевагою ЧМ перед АМ є набагато вища

завадозахищеність. Відносна захищеність дорівнює $\frac{\rho_{чм}}{\rho_{АМ}} = 3 \left(\frac{m_{чм}}{m_{АМ}} \right)^2$.

Якщо врахувати, що $m_{АМ} \leq 1$, а $m_{чм} > 1$, то ЧМ має завадозахищеність не менше ніж в $(3m_{чм})^2$ разів, підвищення завадозахищеності досягнуто за рахунок широкого спектру.

Імпульсна та цифрова модуляції. При імпульсній модуляції в якості сигналу-переносника використовується періодична послідовність імпульсів.

$$a(t) = A_0 \sum_{i=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT, \Delta t), \quad (5.11)$$

де A_0 – амплітуда імпульсів;

$\delta(t)$ – функція, що описує одиночний імпульс послідовності (функція Дірка);

T – період повторення імпульсів;

Δt – тривалість імпульса.

У випадку амплітудної імпульсної модуляції (**AIM**) амплітуда імпульсів змінюється у відповідності з інформаційним сигналом $x(t)$ (рис. 5.5, а), так, що сигнал, який передається, визначається виразом

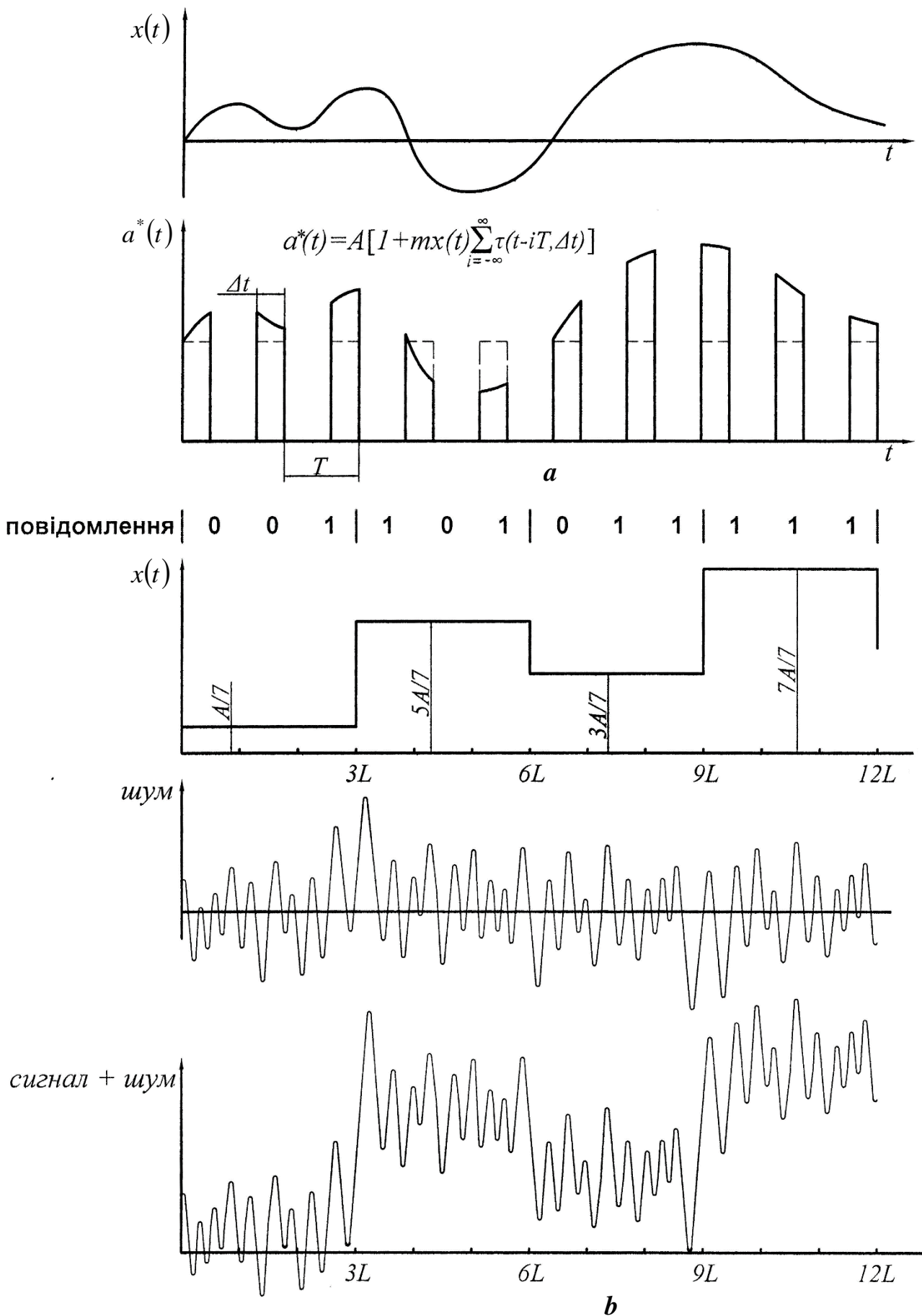


Рис. 5.5. Перетворення сигналів при цифровій AIM

$$a^*(t) = A_0 [1 + mx(t)] \sum_{i=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT, \Delta t), \quad (5.12)$$

де m – коефіцієнт модуляції.

5.2. Цифрові методи модуляції

Цифрові методи модуляції використовуються для передачі кодованих повідомлень дискретними методами. Їх сутність полягає в тому, що неперервний сигнал, який передається, дискретизується в часі, квантується за рівнем і одержані відліки перетворюються в кодові комбінації. Одержаною послідовністю кодових сигналів модулюється високочастотний сигнал-переносник. Таким чином, цифрові методи ґрунтуються на дискретизації, квантуванню та кодуванню.

Перевагами цифрових методів модуляції є:

- висока завадостійкість;
- можливість відновлення сигналів у вузлах мереж, що значно ослаблює ефект накопичення спотворень сигналів при передачі інформації лініями великої протяжності;
- можливість автоматизації передачі і обробки сигналів з допомогою комп'ютерів.

В даний час найбільше розповсюдження набули системи з імпульсною кодовою модуляцією (**ІКМ**), в яких значення сигналу в дискретні моменти часу перетворюються у двійкові цифрові коди.

Цифрова амплітудно-імпульсна модуляція. Припустимо, що кодове повідомлення представлено послідовністю двійкових трьохрозрядних комбінацій. Таким чином всього маємо $2^3 = 8$ можливих комбінацій. Кожній з 8 комбінації ставиться у відповідність окремий сигнал тривалістю в три тактових імпульси $3L$. У випадку **АІМ** вісім сигналів мають форму імпульсів з вісьмома можливими значеннями амплітуди яка показано на рис. 5.5, **b**.

Максимальна амплітуда дорівнює A , мінімальна – 0 , а решта значень амплітуди кратні величині $A/7$. Нехай вказаний на рисункові сигнал $x(t)$ передається по каналу.

Напряга на виході приймача представляє собою сигнал, що передається, спотворений завадами.

Для відновлення кодової послідовності приймач усереднює прийнятий сигнал на протязі кожного інтервалу $3L$, що мінімізує вплив шуму.

Для того, щоб рішення про те, який рівень був переданий на попередньому інтервалі, мало високу достовірність, середньоквадратичне значення шуму повинно бути малим порівняно з відстанню між рівнями $A/7$.

Імпульсно-кодова модуляція. Відмінність між імпульсно-ковою модуляцією (**ІКМ**) та **АІМ** показана на рис. 5.6. Кожний розряд двійкового числа передається окремо: 1 – імпульсом тривалістю L і амплітудою B , а 0 – відсутністю імпульсу. При одній і тій же ймовірності помилок **ІКМ** система може мати приблизно в 10 разів меншу потужність сигналу порівняно з **АІМ**, а при рівних потужностях **ІКМ** система має значно кращі характеристики.

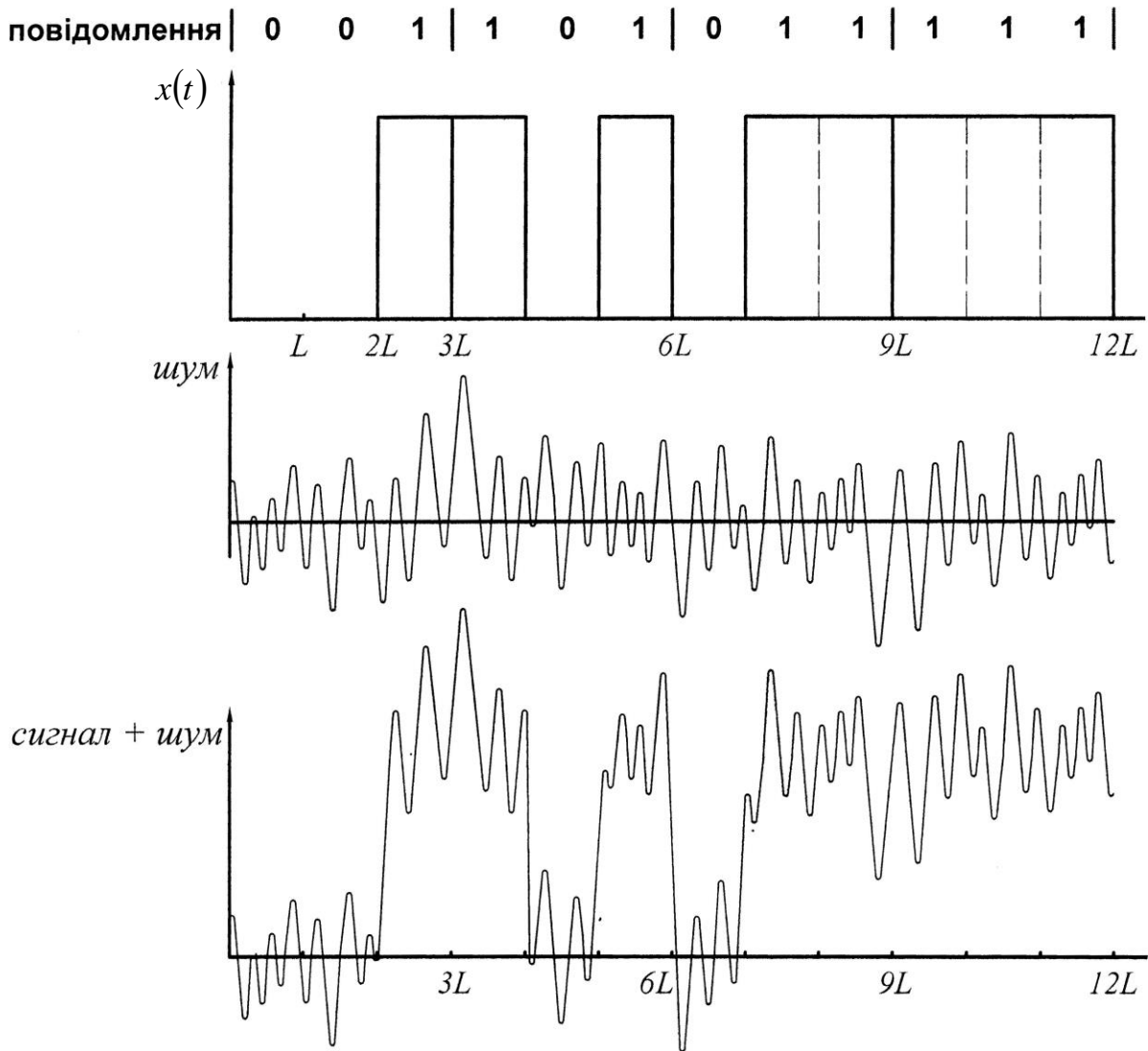


Рис. 5.6. Перетворення сигналів при ІКМ

Фазоімпульсна модуляція. Принцип фазоімпульсної модуляції ілюструється на рис. 5.7. В кожному інтервалі тривалістю $3L$ передається один імпульс з фіксованою амплітудою, але його тривалість становить лише $\frac{3L}{8}$ і він перебуває в одному з вісьми часових положень.

ФІМ-система забезпечує таку ж якість, як і **ІКМ** при зниженні на $\frac{1}{3}$ середньої потужності сигналу, але необхідна смуга частот в цьому випадку розширюється в три рази. Таким чином, в сенсі обміну смуги на співвідношення сигнал-шум, **ФІМ-система** поступається **ІКМ-системі**.

Класифікацію модуляцій за сигналом-носієм представлено на рис. 5.8.

5.2. Маніпуляція

Маніпуляція – дискретний метод модуляції, в якому інформаційний параметр набуває злічене число значень.

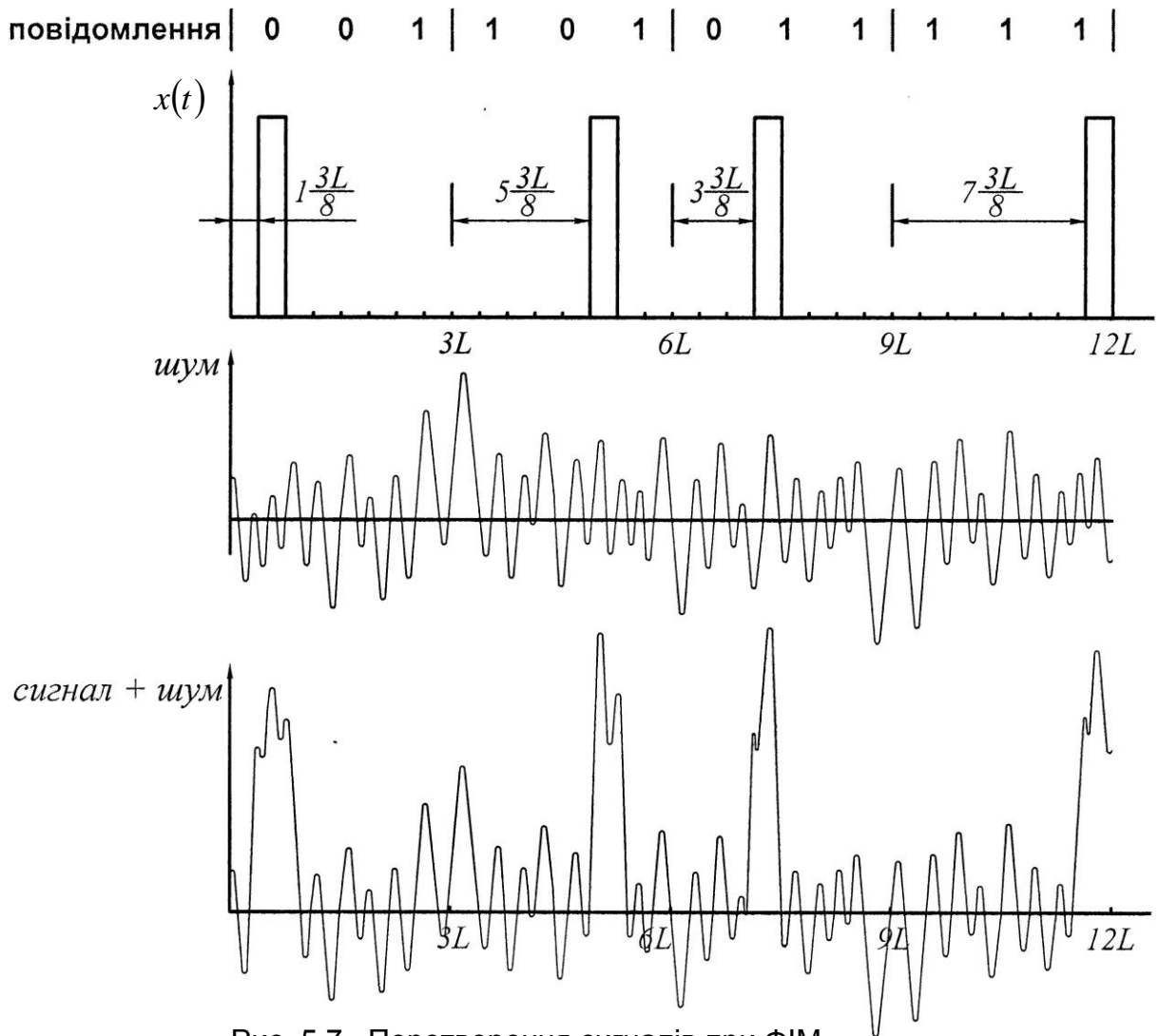


Рис. 5.7. Перетворення сигналів при ФІМ

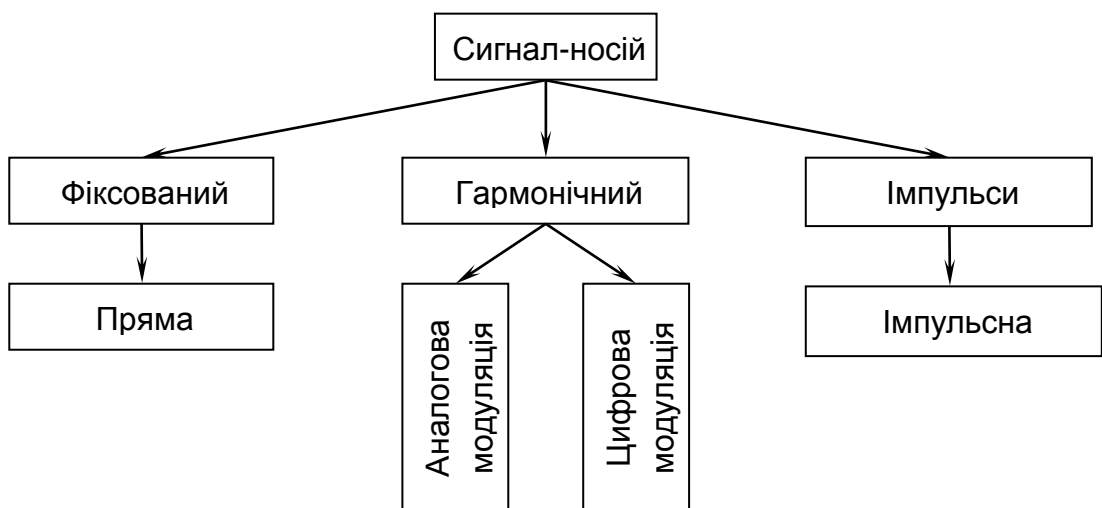


Рис. 5.8. Залежність виду модуляції від типу сигналу-носія.

При **прямій маніпуляції** зміна рівня напруги означає передачу того чи іншого сигналу (U_H – номінальний рівень напруги).

Наприклад, при прямій модуляції дискретного типу кодової комбінації **1010₂** необхідно для кодування повторень символів задатися дискретним проміжком часу Δt , протягом якого передається один символ. Тоді:

– при збільшенні номінального рівня напруги на величину модифікації напруги ΔU_M

– передається двійкова «1»;

– при зменшенні номінального рівня напруги на величину модифікації напруги ΔU_M – передається двійковий «0»;

Амплітудна маніпуляція. При амплітудній маніпуляції (АМн) інформаційним параметром є амплітуда сигналу-переносника, яка змінюється стрибкоподібно під дією модулюючого сигналу.

Наприклад, для амплітудної маніпуляції дискретного типу кодової комбінації **1010₂** необхідно здійснити наступні модифікації амплітуди базового сигналу-носія:

– при збільшенні номінального рівня напруги на величину модифікації напруги ΔU_M – передається двійкова «1»;

– при зменшенні номінального рівня напруги на величину модифікації напруги ΔU_M – передається двійковий «0»;

Частотна маніпуляція. При частотній маніпуляції інформаційний сигнал модулює не потужність сигналу-носія, а його частоту, тобто при постійній амплітуді сигналу несучої частоти змінюється його частота.

Наприклад, для частотної маніпуляції дискретного типу кодової комбінації **1010₂** необхідно здійснити наступні модифікації частоти базового сигналу-носія:

– при збільшенні коливань в період часу $T = 2\Delta t$ у три рази відповідає передачі двійкової «1»;

– при збільшенні коливань в період часу $T = 2\Delta t$ у два рази відповідає передачі двійкового «0»;

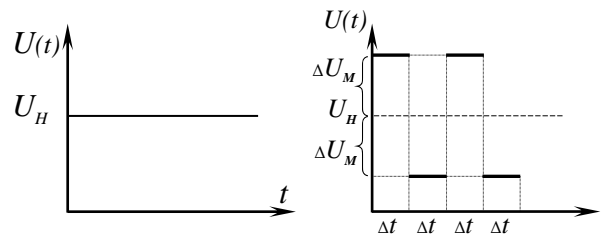


Рис. 5.9. Пряма амплітудна маніпуляція

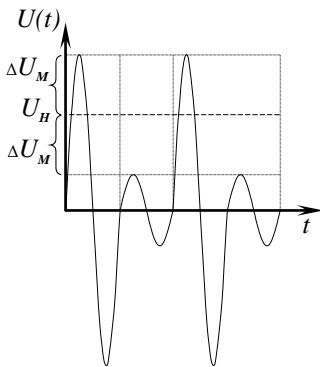


Рис. 5.10 Амплітудна маніпуляція.

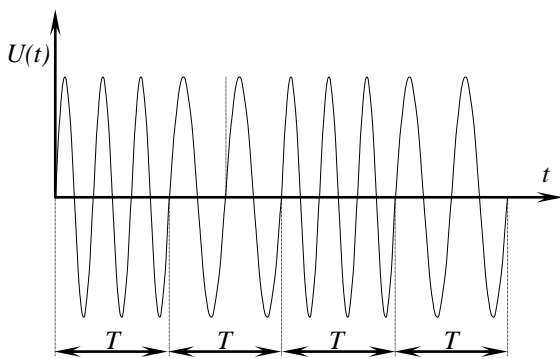


Рис. 5.11. Частотна маніпуляція

Фазова маніпуляція. Суттєва перевага фазової маніпуляції – простота використання. Підсилювач потужності сигналу працює при постійній амплітуді сигналу, що зменшує вимоги до його лінійності.

При фазовій маніпуляції у відповідності з інформаційним сигналом змінюється фаза високочастотного сигналу-носія.

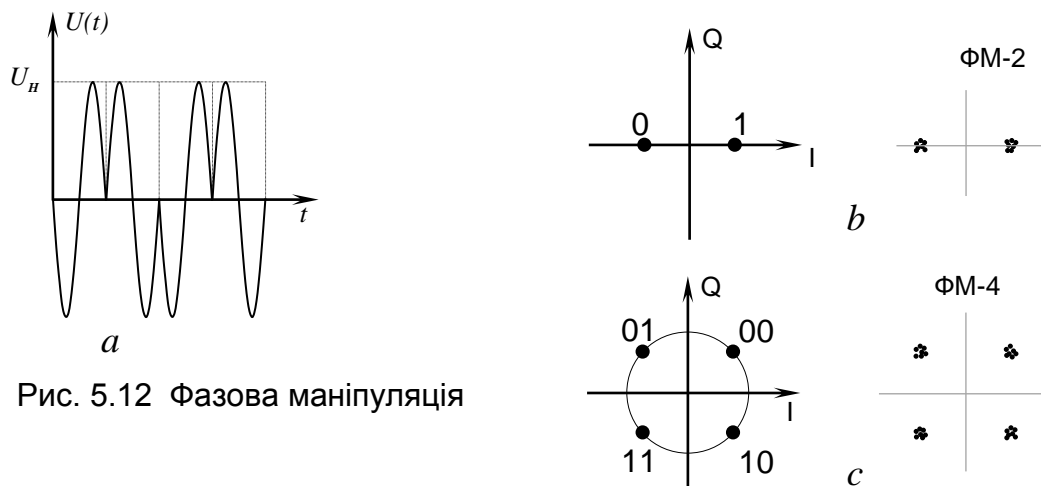


Рис. 5.12 Фазова маніпуляція

При зміні фази сигналу відбувається і зміна частоти (оскільки частота є швидкістю зміни фази в часі. Тобто фазова та частотна маніпуляції дуже подібні. Вони відрізняються лише спектральним складом інформаційного сигналу, що подається на модулятор.

Наприклад, для фазової модуляції дискретного типу кодової комбінації 1010_2 приймаємо:

- відсутність зсуву по фазі на 90° базового сигналу-носія відповідає передачі двійкового «0»;
- наявність зсуву по фазі на 90° базового сигналу-носія відповідає передачі двійкової «1»;

Фазова модуляція може бути двопозиційною ФМ-2 та чотирьох позиційною ФМ-4.

При фазовій модуляції ФМ-2 (рис. 5.12, *b*) значення амплітуди сигналу -1 та $+1$ розглядається як логічний «0» та «1» відповідно. Таке значення зміни амплітуди еквівалентне зміщенню по фазі на 180° , що цілком придатне для передачі бінарних символів. Швидкість передачі, при цьому, становитиме 1 біт/символ.

При модуляції синусними та косинусними інформаційними сигналами символ можна передавати двома сигналами-носіями з однією частотою. Цей метод застосовується в ФМ-4 (рис. 5.12 *c*). В цьому випадку одержуємо чотири фази сигналу-носія: 45° , 135° , 225° , 315° . На рисунку показано значення біт, що передаються кожним станом фази. При цьому вміст біт вибрано таким чином, щоб при переході до сусіднього стану фази сигналу-носія за рахунок помилки прийому приводив не більше, ніж до однієї бітової помилки.

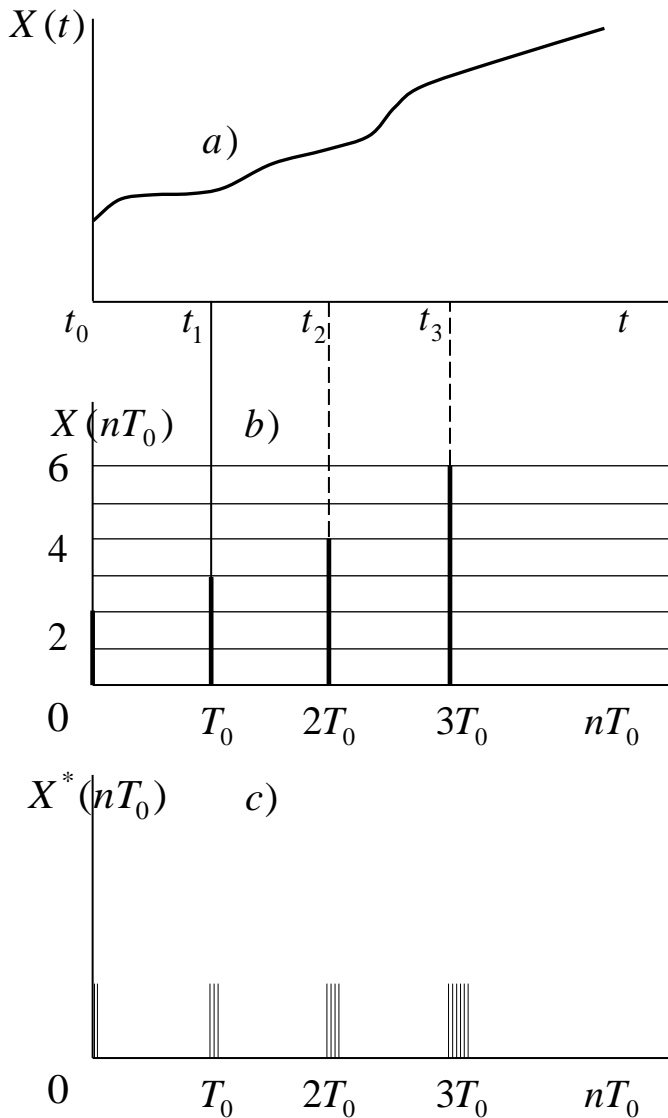
В дійсності ж значення не попадають чітко в одну точку, тому одержуємо сигнальні сузір'я.

Як висновок слід відмітити, що найменшу захищеність має АІМ. Більш високу заводо захищеність має ШІМ. Найбільшу заводо захищеність має кодоімпульсна модуляція ІКМ з використанням коригуючих кодів (коди Хеммінга). При ІКМ значення модулюючого сигналу передаються кодовими комбінаціями імпульсних сигналів, а як відомо коригуючі коди є кодами з надмірною кількістю розрядів. На передачу надмірних одів витрачається більше часу. Тому, як і завжди, виграш у точності досягається за рахунок втрати часу.

§ 6 Цифрові технології запису та передачі інформації.

6.1. Перетворення неперервного сигналу в дискретний кодований сигнал з імпульсно-кодовою модуляцією.

Будь-яка інформація, що передається по каналам зв'язку зазнає спотворень. Якщо порівняти між собою аналогові і цифрові методи передачі і обробки інформації, то аналогові методи більш вразливі до всіляких спотворень і мають граничні можливості щодо підвищення точності. Це пояснюється тим, що при проходженні аналогового сигналу по каналу зв'язку на нього накладається сигнали завад,



амплітуди яких є випадковими функціями часу. В наслідок цього амплітуда сигналу спотворюється. При цифрових методах передачі і перетворення сигналів інформація передається не зміною амплітуди сигналів, а зміною кодових комбінацій. Тому цифрові методи мають практично необмежену точність, передачі і обробки інформації та набувають все більшого розповсюдження.

Перетворення неперервних сигналів у цифровий код здійснюється послідовно, за допомогою наступних операцій:

- дискретизації за часом;
- дискретизації (квантуванню) за рівнем;
- кодуванню.

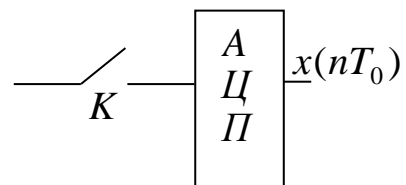


Рис. 6.1. Перетворення неперервного сигналу в дискретний кодовий сигнал.

Наочно ці перетворення можна пояснити за допомогою рис. 6.1.

Неперервний за часом сигнал $x(t)$, показаний на рис. 6.1, **a**, який є також неперервним за рівнем, за допомогою перемикача K , який періодично, з періодом T_0 замикає ланцюг проходження сигналу, перетворюється в дискретний сигнал $x(nT_0)$, значення якого існують тільки в дискретні моменти часу t_0, t_1, \dots, t_n , що

повторюються через період T_0 . В реальних системах інтервал $T_0 = const$ називають періодом дискретизації. Крім того, значення сигналу $x(nT_0)$ в кожний момент часу є квантова ними за рівнем. Операція квантування за рівнем полягає у тому, що весь діапазон зміни параметра сигналу представляють визначеним числом мінімальних порцій (квантів). Рівень сигналу не може ділитися на частки, менші за один квант.

Квант – це найменший розряд коду, який застосовується для кодування.

Отже, якщо сигнал квантований за рівнем, то його значення знаходиться у дискретній множині чисел. Далі дискретний за часом і за рівнем сигнал для його передачі по каналу зв'язку, або для обробки в ЕОМ та зчитування треба закодувати.

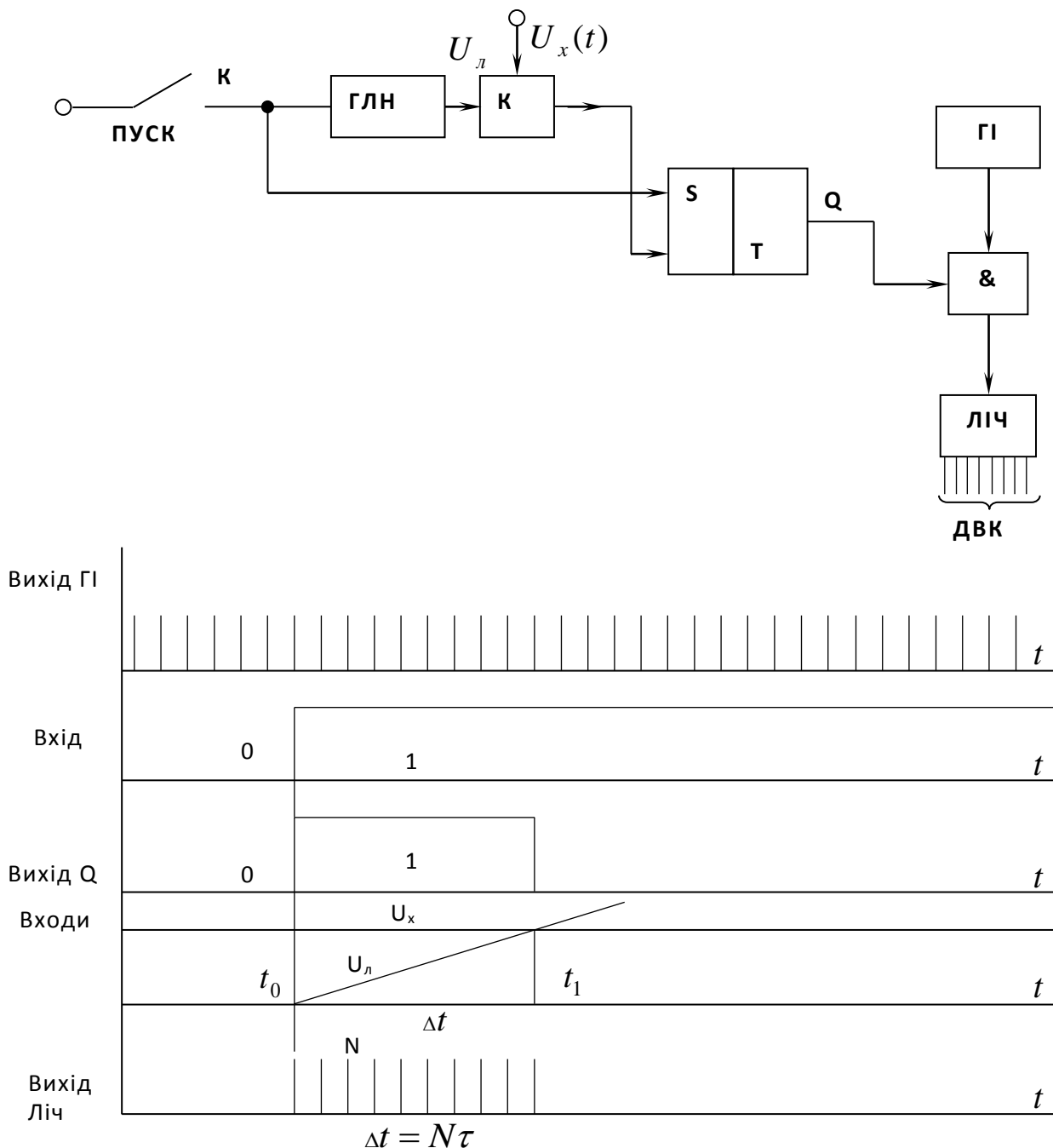


Рис. 6.2. Схема функціональна та діаграма часова АЦП

Кодування – це перетворення сигналів інформації з однієї системи символів у іншу, яка є зручною для передачі, обробки, зберігання.

Найпростішим кодом для кодування числової інформації є число-імпульсний або унітарний код. Числове значення квантованого за рівнем сигналу в цьому коді передається таким же числом коротких імпульсів з постійним періодом і амплітудою, як показано на рис. 6.1.с). Пристрій, в якому реалізуються розглянуті операції аналого-дискретного перетворення, називається **аналогово-цифровим перетворювачем**.

В АЦП часоімпульсного перетворення, схема якого наведена на рис. 6.2 розглянуті операції здійснюються в такій послідовності. При натисканні ключа K тригер T перекидається в стан $Q=1$ і одночасно запускається генератор лінійної напруги $ГЛН$. Логічний ключ $\&$ відкривається і пропускає імпульси унітарного коду від генератора імпульсів $ГІ$. Як тільки лінійно-зростаюча напруга $ГЛН$ досягне значення $U_{л} \geq U_x$, компаратор K видає сигнал на нульовий вхід тригера. Тригер перекидається в $Q=0$ і закриває «ворота» для імпульсів унітарного коду. За час $\Delta t = t_1 - t_0$ в лічильник пройшло N імпульсів, число N пропорційне значенню неперервного сигналу U_x в момент t_1 , тому що $\frac{U_x}{\Delta t} = tg\alpha = c$.

Отже

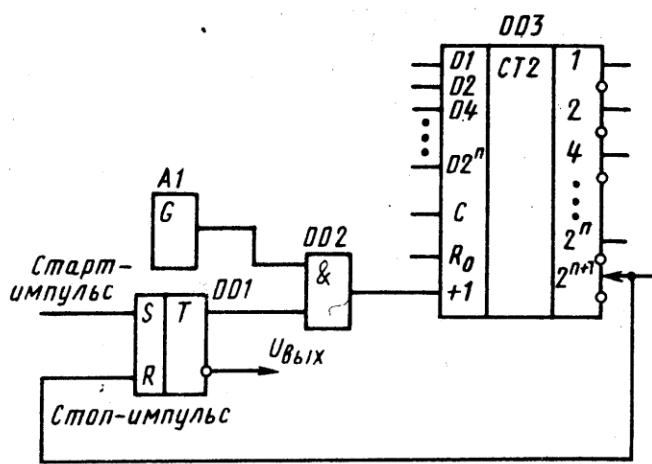
$$U_x = c \tau N \quad (6.1)$$

де τ – період імпульсів унітарного коду; $c = const$

Лічильник перетворює унітарний код на двійковий ($ДК$) або двійково-десятковий. При аналого-числовому перетворенні сигнали інформації зчитуються (реєструються) тільки в певні моменти часу. Вважається, що інформація між моментами зчитування залишається незмінною. Але таке допущення може бути справедливим, якщо інтервал часу між моментами зчитування досить малим. В інших випадках при відновленні інформації за результатами дискретних відліків відбувається втрата інформації. Для виключення таких випадків період дискретизації необхідно розраховувати за теоремою Котельнікова.

Перетворювач коду в часовий інтервал (ПК-ШІМ). Для перетворення коду в послідовність прямокутних імпульсів зі змінною шпаруватістю служить ПК-ШІМ. На рис. 6.3,а представлена схема ПК-ШІМ, що складається з лічильника імпульсів, виконаного на мікросхемі $DD3$, генератора імпульсів G , RS -тригера та елемента I , виконаного на мікросхемі $DD2$. Робота перетворювача синхронізується імпульсами, які надходять з блоку управління. Код числа, що підлягає перетворенню, надходить на сигнальні шини установки коду ($D1, D2, \dots$) лічильника $DD3$ і фіксується в ньому.

Тригер $DD1$ встановлюється у вихідне (одиничне) положення тактующим старт-імпульсом з блоку управління, що задає період T роботи перетворювача. При цьому сигнал з виходу тригера дозволяє проходження імпульсів з генератора G через елемент співпадання (збігу) $DD2$ на підсумовуючий вхід лічильника. Перетворення



а)

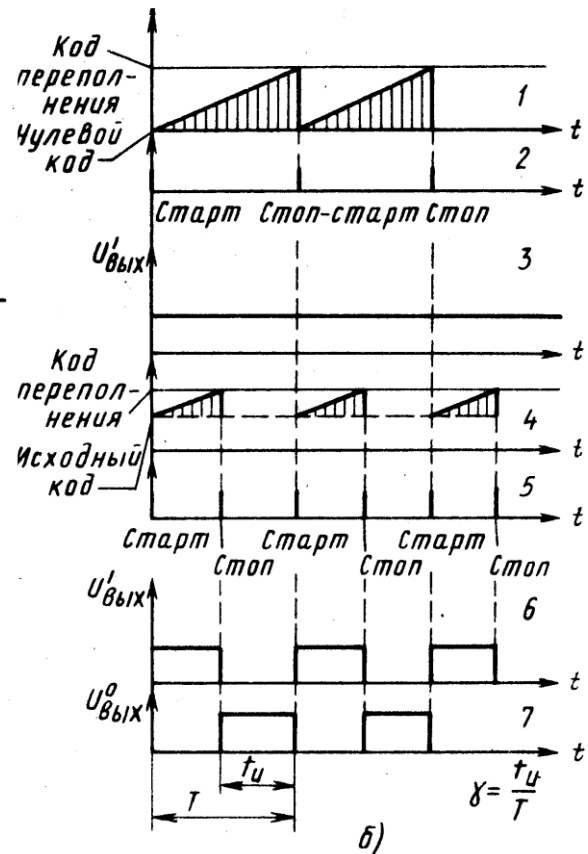
Рис. 6.3 Перетворювач ПК-ШІМ

коду здійснюється підсумовуванням імпульсів що надійшли. Діаграми, зображені на рис. 9.3, б, пояснюють принцип перетворення.

При вихідному (початковому) коді, що дорівнює нулю, з приходом старт-імпульсу, який фіксує початок перетворення, лічильник працює на додавання (діаграма 1). Під впливом монотонно зростаючого коду лічильника, старший розряд формує імпульс переповнення. Цей імпульс переводить лічильник в нульове положення (на діаграмі 1 стан лічильника відображає пилоподібною напругою) і у вигляді стоп-імпульсу (діаграма 2), що фіксує кінець тимчасового інтервалу, надходить на вхід R тригера DD1. Тригер перемикається в нульовий стан і припиняє подачу імпульсів в лічильник. З приходом нового старт-імпульсу робочий цикл повторюється. Оскільки тригер DD1 практично весь час знаходиться в одиничному стані, шпаруватість імпульсів, що знімаються з його виходу, дорівнює нулю (діаграма 3).

При наявності в DD3 вихідного (початкового) коду, що відмінний від нуля, лічильник з приходом старт-імпульсу починає підсумовувати, але не з нуля, а з коду, який зафіксований в лічильнику (діаграма 4). Очевидно, що ця сума буде відповідати коду, який зворотній до вихідного. Оскільки крутість наростання коду лічильника залишилася попередньою, то момент переповнення лічильника, а отже, вироблення стоп-імпульсу настане раніше закінчення періоду T (діаграма 5). Чим більшим буде вихідний код, тим коротшим буде інтервал часу і тим коротші прямокутні імпульси напруги, що одержуються на прямому виході тригера DD1 (діаграма 6).

Для отримання прямокутних імпульсів, що відповідають вихідному коду, вихідний сигнал $U_{ВІХ}$ необхідно знімати з інверсного виходу тригера (діаграма 7). Шпаруватість імпульсів визначається відношенням $\gamma = t_i/T$, де t_i – інтервал часу між стоп-імпульсом і наступним старт-імпульсом.



б)

6.2. Відтворення первинного неперервного сигналу за відліками дискретного сигналу.

При дискретизації неперервних процесів постає задача вибору такого максимального періоду дискретизації, при якому похибка інформації не перевищує дозволеного значення.

Частота дискретизації (або частота семплірування) показує скільки разів АЦП виконає замір тієї чи іншої характеристики аналогового сигналу. Вимірюється в Герцах (зазвичай приймають кілогерци).

Чим вища частота дискретизації, тим якіснішим буде оцифровування. **Частота Найквіста** — це найвища частота сигналу, який може бути відновлений без спотворення після процесу дискретизації. Теорема про вибірки Найквіста доводить, що частота дискретизації повинна бути, принаймні, удвічі вище найвищої частоти оброблюваного сигналу (F_{\max}), щоб можна було відновити вихідний сигнал без спотворення, тобто $F_s = 2 \cdot F_{\max}$.

Теорема Найквіста стала однією з фундаментальних основ теорії інформації. У Радянському Союзі ця теорема відома як **теорема Котельникова** (У 1940-х роках дана теорема в рамках закритих робіт з теорії зв'язку була незалежно доведена Найквістом, М.А. Котельниковим і Клодом Шенноном)

Теорема. *Якщо неперервна функція $x(t)$ задовольняє умовам Діріхле, тобто вона є обмеженою, кусочно-неперервною і має кінцеве число екстремумів, та її спектр обмежений деякою частотою ω_3 (частотою зрізу), то існує такий максимальний інтервал Δt між відліками, при якому можна відновити вихідну неперервну функцію за дискретним значенням без похибки. Цей максимальний інтервал:*

$$\Delta t = \frac{\pi}{\omega_3} = \frac{1}{2f_3} \quad (6.2)$$

Доведення теореми Котельникова базується на розкладанні неперервної функції в ряд, який називається рядом Котельникова:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k \cdot \Delta t) \frac{\sin \omega_3(t - k \cdot \Delta t)}{\omega_c(t - k \cdot \Delta t)}. \quad (6.3)$$

Послідовність відліків $x(k \cdot \Delta t)$ утворює так звану решітчасту функцію, а множник:

$$\frac{\sin \omega_3(t - k \cdot \Delta t)}{\omega_c(t - k \cdot \Delta t)}. \quad (6.4)$$

є функцією відліків. Таким чином, функція $x(t)$ розкладається в ряд Котельникова по системі базисних функцій $g_k(t)$, коефіцієнтами розкладання є значення $x(k \cdot \Delta t)$ в дискретні моменти часу. Практичного значення теорема Котельникова набуває у випадках сигналів з обмеженим спектром, коли відома найвища частота спектру ω_3 . Цінним є також те, що по каналу зв'язку достатньо передавати тільки значення

$x(k \cdot \Delta t)$, а функцію відліків на приймальному кінці можна відтворити обчислювальним методом. В результаті складання функцій відліків з ваговим коефіцієнтом, що дорівнює значенню відліку, отримуємо ряд Котельнікова, тобто первинну неперервну функцію.

Для практичної реалізації відновлення неперервних сигналів цінним є те, що функція відліків відповідає змінні в часі напруги на виході ідеального фільтра нижніх частот (ФНЧ), який однаково пропускає всі частоти від 0 до ω_3 , при поданні на вхід ФНЧ сигналу виду δ -функції. Отже, для відновлення неперервної функції $x(t)$ необхідно подати на вхід ідеального ФНЧ з верхньою межею пропускання ω_3 послідовність коротких імпульсів, амплітудно-модульованих сигналом $x(t)$ в моментах відліку, які слідують з періодом $\Delta t = \frac{\pi}{\omega_3}$. В комп'ютерних мережах теорема

Котельнікова застосовується для обчислення періоду дискретизації аналогових сигналів, що передаються по телефонних каналах. У спектрі телефонного сигналу за стандартом найвищою є частота 4000 Гц , отже, частота дискретизації дорівнює 8000 Гц , а період дискретизації – $0,000125 \text{ с}$, або 125 мкс . В системах автоматичного керування на застосування теореми Котельнікова накладаються обмеження, які не дозволяють застосовувати пряме обчислення періоду дискретизації. Реальні сигнали $x(t)$ завжди існують на обмежених інтервалах часу, тому їх спектри необмежені. Але наслідки з цієї фундаментальної теореми дали можливість розробити інші інженерні методики обчислення оптимального періоду дискретизації, – B – характеристик та частотний метод Джурі.

Контрольні запитання.

1. В чому переваги цифрових методів запису і передачі інформації перед аналоговими?
2. Як здійснюється дискредитація з часом неперервного сигналу?
3. В чому полягає процес квантування сигналу за рівнем і як він здійснюється в АЦП часоімпульсного перетворення?
4. Де і як застосовується одиничний код в цифрових інформаційних пристроях?
5. В якому пристрої і як одиничний код перетворюється в двійковий?
6. Як реалізується процес імпульсно-кової модуляції в АЦП?
7. Теорема Котельнікова та її застосування в інформаційних системах.
8. Ряд Котельнікова – послідовність відліків і функція відліків, відновлення неперервного сигналу за відліками дискретизованого.

§ 7 Кодування і декодування повідомлень.

7.1. Позиційні системи числення.

Для передачі повідомлення по каналу зв'язку його необхідно закодувати. Кодування інформації – це її представлення у формі, яка є зручною для передачі, приймання і зберігання.

Загальновідомим і широкоживаним кодом свого часу була азбука Морзе або код Морзе. За допомогою цього коду будь-яке змістовне або числове повідомлення може бути зображене комбінацією елементарних сигналів – точки і тире (короткої паузи і довгої паузи).

Кодування – відображення множини станів одної системи множиною станів іншої системи.

Кожен код утворюється комбінацією певного числа символів. Найпростішим є код, що утворюється комбінацією з одного символу – 1. Цей код називається **унітарним**. Будь-яке додатне число в цьому коді представлене відповідною кількістю одиниць. Наприклад, $1_{10} = 1_1$, $5_{10} = 11111_1$, $9_{10} = 111111111_1$, тощо. Технічна реалізація цього коду здійснюється послідовно відповідної кількості імпульсів від генератора імпульсів. Цей код вживається у вимірювальній техніці як проміжний, при перетворенні десяткових чисел у **бінарний** (двійковий) код.

Найбільшого застосування у практиці кодування інформації набули десятковий та двійковий коди, а також різновиди двійкового коду – двійково-десятковий, вісімковий та шістнадцятковий.

Десятковий код, або десяткову систему числення ввів у користування арабський математик Аль Хорезмі (Абу Абдаллах Мухаммад ібн Муса ал Хорезмі) у IX ст. Від його прізвища „Аль Хорезмі” (з Хорезму) походить сучасне „алгоритм”. А від назви його твору „Кітаб ал-джебр ал-мукабала” походить сучасне „алгебра”. З тих пір для загального користування людство ще нічого кращого не придумало. Якщо порівняти між собою ті системи числення, які існували до десяткової – дванадцяткову, сімкову, та римську з десятковою, то інформативність і простота користування останньої надали їй переваги, завдяки яким вона витіснила всі інші.

Загальноприйнятим на даний час є позиційний принцип утворення системи числення (значення (вага) кожного символу залежить від його положення – позиції в рядку символів, що представляють число). Саме тому десяткова система має високу інформативність. В цій системі **власна вага** кожної цифри, що займає певне місце (**позицію**) у числі, **множиться на відповідний ваговий коефіцієнт** – 1, 10, 100 і т.д. або 0,1, 0,01, 0,001 і т.д. Завдяки цьому, **десяткове число можна зобразити сумою складових**, або рядом, кожний член якого є добутком цифри, що стоїть на певному місці, помноженої на ваговий коефіцієнт цього місця.

Позиційна система числення (позиційна нумерація) – система числення, в якій значення кожного цифрового знаку (символу) в комбінації (числі) залежить від його позиції (розряду).

Оскільки саме десяткова система інтуїтивно найзрозуміліша, то, для кращого розуміння термінів «вага комбінації» і «вага символу», розглянемо, наприклад,

комбінацію 143_{10} . Запишемо її у вигляді словесної суми: $143_{10} = 100 + 40 + 3$. «Зважимо» цю комбінацію на уявних шальках (рис. 7.1,а).

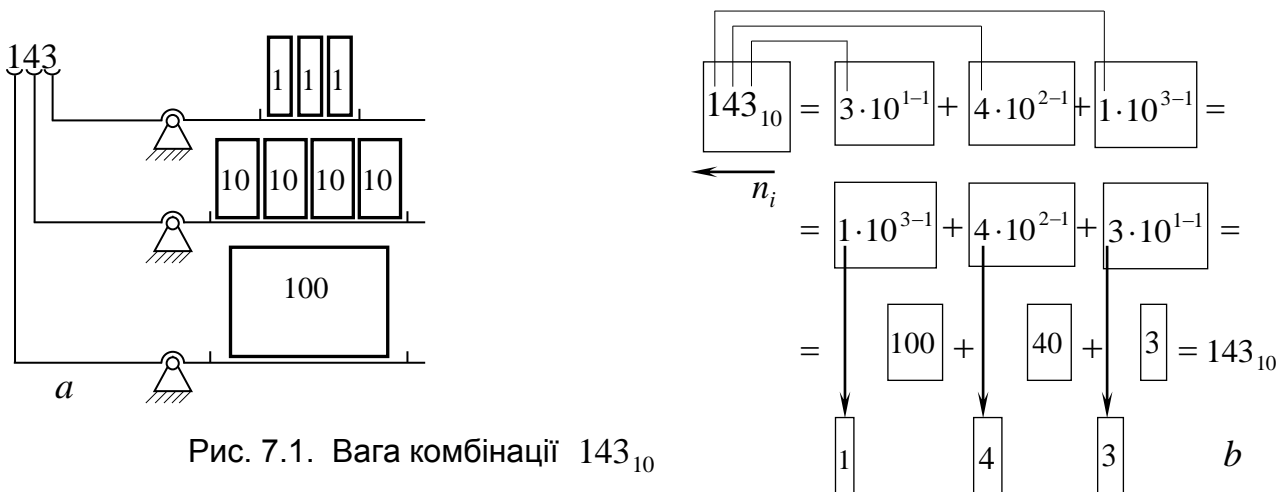


Рис. 7.1. Вага комбінації 143_{10}

$$143_{10} = 1 \cdot 100 + 4 \cdot 10 + 3 = 1 \cdot 10^2 + 4 \cdot 10^1 + 3 \cdot 10^0$$

Очевидно, що аналогом «гирок» є вагові множники (рис. 7.1,б) відповідних розрядів. Вага на кожній шальці (розряді) визначається кількістю відповідних «номіналів гирок», тобто символ (цифра) кожного розряду, вказує на кількість відповідних вагових множників.

Як бачимо, *тільки у першому розряді символ (цифра) має «власну» вагу.*

На прикладі тієї ж десяткової системи покажемо метод визначення символів (цифр) при переведенні комбінації (числа) з однієї системи в іншу. Для цього поділимо «не по-шкільному» (рис. 7.2) дану комбінацію 143 на 10: відділимо знаком «плюс» комбінацію зліва і вертикальною рисою справа; справа запишемо дільник 10, а лівіше знаку «плюс» записуватимемо залишки від ділення або нуль, якщо ділення без залишку. Прочитаний знизу вгору після завершення ділення лівий стовпець дає шукану комбінацію (число). Виписавши символи другого рядка (рис. 7.1,), одержимо цю ж комбінацію. У практиці первинна інформація подається у десятковому кодї, обробка апаратними засобами виконується у двійковому кодї і вторинна інформація знову подається в десятковому кодї, тому операцію переведу числа з десяткового коду до двійкового властиво називати **кодуванням**, а зворотну операцію – **декодуванням**.

Позиційна система числення (кодування) може мати основою будь-яке інше число (символ, комбінацію), наприклад основу m . Тоді ціле число A в цій системі можна подати сумою

$$A_m = \sum_{i=1}^{n-1} a_i \cdot m^{n_i-1} = a_1 m^{1-1} + a_2 m^{2-1} + a_3 m^{3-1} + \dots + a_n m^{n-1} \quad (7.1)$$

де i – індекс, що рухається від меншого розряду до більшого;

a_i – символ i -го розряду; (значення змінюються від 1 до $m-1$);

m – основа (алфавіт) системи числення (числення);

n_i – номер i -го розряду (нумерація справа наліво).

У десятковій системі $m = 10$, $c_i = 0; 1, 2, \dots, 9$.

ЗАУВАЖЕННЯ:

Оскільки в даному розділі (і далі) вивчається кодування, то, з метою уникнення плутанини, надалі термін «число» замінюватиметься терміном «кодова комбінація», а термін «цифра» – терміном «символ».

Систему кодування позначатимемо правим нижнім індексом.

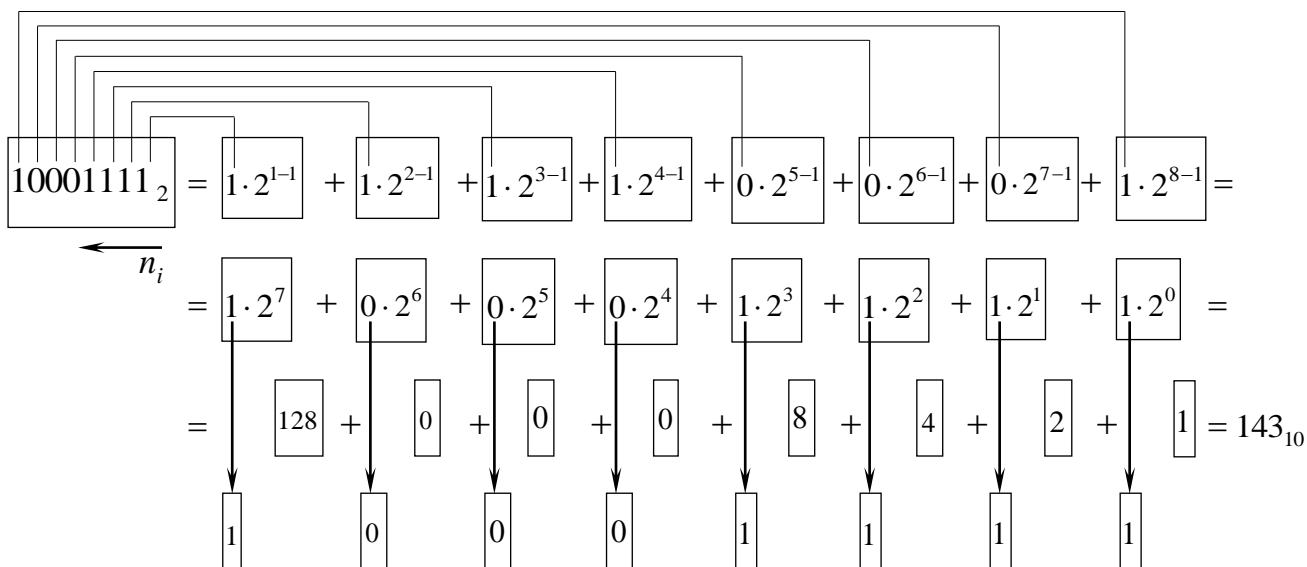


Рис. 7.3. Схема визначення вагових множників бінарного кодування

Табл. 7.1. Кодування з різними основами

N ₁₀	N ₈	N ₁₆	N ₂
0	0	0	0000
1	1	1	0001
2	2	2	0010
3	3	3	0011
4	4	4	0100
5	5	5	0101
6	6	6	0110
7	7	7	0111
8	10	8	1000
9	11	9	1001
10	12	A	1010
11	13	B	1011
12	14	C	1100
13	15	D	1101
14	16	E	1110
15	17	F	1111
16	20	10	10000
17	21	11	10001

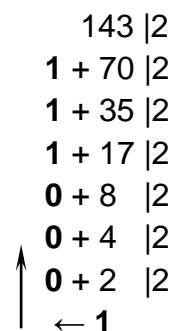
У двійковій системі $m = 2$, $c_i = 0; 1$, (для

зображення кодової комбінації використовуються два символи – 0 та 1).

Візьмемо двійкову комбінацію 10001111_2 і розкладемо її в ряд за основою 2 (визначимо вагу бінарної комбінації) (рис. 7.3.):

Отже, двійкове число ми закодували десятковим кодом. Порівняємо інформативність десяткового і двійкового коду. Довжина десяткового коду в три рази менша за довжину двійкового. Виконаємо операцію декодування, тобто переведемо десяткову комбінацію 143_{10} у двійковий код за схемою рис. 7.2.

Для відділимо знаком «плюс» комбінацію зліва і вертикальною рисою справа; справа запишемо дільник 2, а лівіше знаку «плюс» записуватимемо залишки від ділення або нуль, якщо ділення без залишку. Прочитаний знизу вгору після завершення ділення



лівий стовпець дає шукану комбінацію (число). Відповідно до викладеного вище: *остання частка від ділення, значення якої менше від основи системи числення (кодування), є символом (цифрою) при основі системи кодування (числення) у найвищому розряді (або остання остача, що рівнозначно). Решта остач будуть символами молодших розрядів.*

Оскільки крім двійкового і десяткового кодів у обчислювальній техніці застосовуються вісімковий і шістнадцятковий коди, як проміжні коди для спрощення і прискорення операцій кодування і декодування, програмування і вводу комбінацій в ЕОМ, тому доцільно скласти таблицю символів для цих кодів.

Приклад 1: закодувати комбінацію 143_{10} вісімковим кодом.

Скористаємося раніше розглянути-ми схемами:

$$143_{10} = 128 + 8 + 7 =$$

$$= 2 \cdot 64 + 1 \cdot 8 + 7 =$$

$$= 2 \cdot 8^{3-1} + 1 \cdot 8^{2-1} + 7 \cdot 8^{1-1} = 217_8$$

	3143 | 8	
	7 + 392 | 8	
	0 + 49 | 8	
↑	1 + 48 | 8	
←	6	

	143 | 8	
	7 + 17 | 8	
↑	1 + 2 | 8	
←	2	

Приклад 2: закодувати комбінацію 3143_{10} вісімковим і шістнадцятковим кодами.

$$3143_{10} = 3072 + 64 + 0 + 7 = 6 \cdot 512 + 1 \cdot 64 + 7 =$$

$$= 6 \cdot 8^{4-1} + 1 \cdot 8^{3-1} + 0 \cdot 8^{2-1} + 7 \cdot 8^{1-1} = 6107_8$$

	3143 | 16	
	7 + 196 | 16	
↑	4 + 12 | 16	
←	12	

	3143 ₁₀ = 3072 + 64 + 7 = 12 · 256 + 4 · 64 + 7 =	
	= C · 16 ³⁻¹ + 4 · 16 ²⁻¹ + 7 · 16 ¹⁻¹ = C47 ₁₆	

Для встановлення правила переведення десяткових дробових виразів у системні дробові вирази в системі кодування з основою m , формула (7.1.) цілком придатна, якщо змінити напрям нумерації:

$$B_m = \sum_{j=0}^{-k-1} b_j \cdot m^{-k_j-1} = b_1 m^{0-1} + b_2 m^{1-1} + b_3 m^{2-1} + \dots + b_n m^{-k-1} \quad (7.2)$$

де j – індекс, що рухається від більшого розряду до меншого (зліва направо);

b_j – символ j -го розряду;

m – основа (алфавіт) системи кодування (числення);

k_i – номер j -го розряду (нумерація зліва направо).

Якщо одержану таким чином дробову частину помножити на основу кодування m , то ціла частина отриманого результату, очевидно, буде шуканим символом першого розряду після коми c_{-1} . Якщо дробову частину (одержану після першого множення) знову помножити на основу кодування, то ціла частина отриманого результату буде шуканим символом другого розряду після коми c_{-2} . Цей процес закінчиться, коли результатом буде скінченний дріб (дробова частина дорівнюватиме нулю), або буде досягнута необхідна точність для нескінченного дробу.

Переведемо, наприклад десятковий дріб $0,675_{10}$ у просту бінарну, вісімкову та шістнадцяткову кодові комбінації, модернізувавши розглянуті раніше схеми:

$0,675 \cdot 10$ \downarrow $6 + 0,750 \cdot 10$ $7 + 0,500 \cdot 10$ $5 + 0$	$0,675 \cdot 8$ $5 + 0,400 \cdot 8$ $3 + 0,200 \cdot 8$ \downarrow $1 + 0,600 \cdot 8$ $4 + 0,800 \cdot 8$ $6 + 0,400 \cdot 8$ $3 + 0,200 \cdot 8$ $1 + 0,600 \cdot 8$ \downarrow $4 + 0,800 \cdot 8$ $6 + 0,400 \cdot 8$ $3 + 0,200 \cdot 8$ $1 + 0,600 \cdot 8$ $4 + 0,800 \cdot 8$ $6 + 0,400 \cdot 8$	$0,675 \cdot 16$ $10 + 0,800 \cdot 16$ $12 + 0,800 \cdot 16$ \downarrow $12 + 0,800 \cdot 16$ $12 + 0,800 \cdot 16$ $12 + 0,800 \cdot 16$ $12 + 0,800 \cdot 16$ $12 + 0,800 \cdot 16$ $12 + 0,800 \cdot 16$ $12 + 0,800 \cdot 16$ $12 + 0,800 \cdot 16$ $12 + 0,800 \cdot 16$ $12 + 0,800 \cdot 16$ $12 + 0,800 \cdot 16$ $12 + 0,800 \cdot 16$	$0,675 \cdot 2$ \downarrow $1 + 0,350 \cdot 2$ $0 + 0,700 \cdot 2$ $1 + 0,400 \cdot 2$ $0 + 0,800 \cdot 2$ $1 + 0,600 \cdot 2$ $1 + 0,200 \cdot 2$ $0 + 0,400 \cdot 2$ $0 + 0,800 \cdot 2$ $1 + 0,600 \cdot 2$ $1 + 0,200 \cdot 2$ $0 + 0,400 \cdot 2$ $0 + 0,800 \cdot 2$ $1 + 0,600 \cdot 2$ $1 + 0,200 \cdot 2$
--	--	---	--

$$0,675_{10} = 0,600 + 0,070 + 0,005 = 6 \cdot 10^{0-1} + 7 \cdot 10^{-1-1} + 5 \cdot 10^{-2-1}$$

$$0,675_{10} = 0,625 + 0,0469 + 0,0019 + 0,0009 + 0,0002 =$$

$$= 5 \cdot 0,125 + 3 \cdot 0,015625 + 1 \cdot 0,001953 + 4 \cdot 0,000244 + 6 \cdot 0,0000305 = 5(3146)_8$$

$$0,675_{10} = 0,625 + 0,0469 + 0,0029 + 0,000183 + 0,0002 =$$

$$= A \cdot 0,0625 + C \cdot 0,003906 + C \cdot 0,000244 + C \cdot 0,000015 = 0, A(C)_{16}$$

$$0,675_{10} = 0,500 + 0,125 + 0,03125 + 0,015625 + 0,001953 + =$$

$$= 1 \cdot 2^{0-1} + 0 \cdot 2^{-1-1} + 1 \cdot 2^{-2-1} + 0 \cdot 2^{-3-1} + 1 \cdot 2^{-4-1} + 1 \cdot 2^{-5-1} + 0 \cdot 2^{-6-1} + 0 \cdot 2^{-7-1} = 0,1010(1100)_2$$

Бінарні комбінації мають велику кількість розрядів, тому для зручності запису була запропонована система шістнадцяткових комбінацій, тобто це не нова система числення, а лише зручна система запису двійкових комбінацій. Для цього бінарну комбінацію розбивають на тетради, кожна з яких кодується шістнадцятковим символом (0, 1, 2, ... 9, A, B, C, D, E, F).

Якщо десяткова комбінація включає цілу та дробову частини, то при переході до кодових комбінацій з іншими основами кодування цілої та дробової частин виконують окремо, тоді шукана комбінація C_m зображується

$$C_m = A_m, B_m, \quad (7.3)$$

тобто є сумою цілої та дробової частин.

Зворотні перетворення зручно виконувати додаванням порозрядної ваги усіх символів, як це впливає з формул (7.1) та (7.2).

Оскільки апаратні засоби працюють з бінарними кодами, то саме вони розглядаються в подальшому матеріалі.

7.2. Арифметичні та логічні бінарні операції.

При вивченні дій з бінарними комбінаціями необхідно набути навиків з двійковою арифметикою. В табл. 7.2. подано правила виконання операцій додавання, віднімання, множення та ділення одно розрядних двійкових чисел.

Таблиця 7.2. Правила виконання арифметичних операцій

Додавання	Множення	Віднімання	Ділення
$0 + 0 = 0$	$0 \times 0 = 0$	$0 - 0 = 0$	$0 : 1 = 0$
$0 + 1 = 1$	$0 \times 1 = 0$	$1 - 0 = 1$	$1 : 1 = 1$
$1 + 0 = 1$	$1 \times 0 = 0$	$1 - 1 = 0$	
$1 + 1 = 10$	$1 \times 1 = 1$	$0 - 1 = 1^*$	

*Береться із старшого розряду.

Питання: як передати від'ємну бінарну комбінацію цифровим сигналом?

Для запису від'ємних бінарних комбінацій застосовується додатковий код. Старший розряд цього коду називається знаковим розрядом:

- якщо символ цього розряду «0», то це означає, що кодова комбінація додатна;
- якщо символ цього розряду «1», то кодова комбінація від'ємна.

Щоб від'ємна бінарна комбінація була придатною для арифметичних операцій, символи в розрядах такої ж додатної бінарної комбінації інвертуються (змінюються на протилежні: «0» на «1», а «1» на «0») і, крім того, до неї додається одиниця.

Візьмемо, наприклад, бінарну комбінацію 01100_2

Складаємо від'ємну бінарну комбінацію

і додаємо до неї одиницю:

$$\begin{array}{r} 1\ 0\ 0\ 1\ 1 \\ 1 \\ \hline -12_{10}\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0_2 \end{array}$$

Виконаємо перевірку:

$$\begin{array}{r} \text{Сума:} \\ 12_{10}\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0_2 \\ -12_{10}\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0_2 \\ \hline 0\ 0\ 0\ 0\ 0 \end{array}$$

(Перенос за знаковий розряд ігнорується)

$$\begin{array}{r} -12 \\ -3 \\ \hline 9 \end{array} \quad \begin{array}{r} 1100 \\ -0011 \\ \hline 1001 \end{array}$$

Дію віднімання бінарних комбінацій можна виконати так само як і в десяткових кодах («позичаючи» одиницю в старшому розряді), але для багаторозрядних кодів така процедура значно

утруднюється.

Крім арифметичних операцій до бінарних комбінацій часто застосовуються логічні, що розглядаються в алгебрі Буля. В ній дії над числами, що набувають тільки двох значень – лог.0 і лог.1, які називаються **двійковими змінними**. Двійкову природу змінної як об'єкта булевої алгебри визначають у такий спосіб:

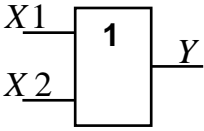
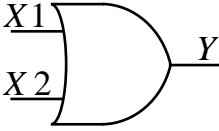
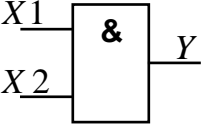
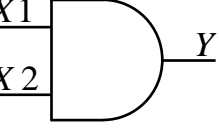
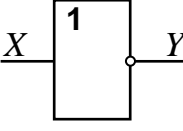
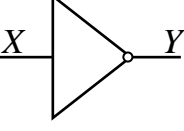
позначають якусь змінну літерою X , тоді:

$$X = 1, \text{ якщо } X \neq 0;$$

$$X = 0, \text{ якщо } X \neq 1;$$

Для зручності зведемо в таблицю логічні функції та графічне позначення відповідних логічних елементів (ЛЕ).

Табл. 7.3. Логічні елементи та їх графічне позначення.

Назва операції	Логічна функція	Графічне позначення ЛЕ		Входи		Вихід
		СНД	Міжнародне	X	Y	F
Логічне додавання	OR АБО (ДИЗ'ЮНКЦІЯ)			1 1 0 0	1 0 1 0	1 1 1 0
Логічне множення	AND І (КОН'ЮНКЦІЯ)			1 1 0 0	1 0 0 1	1 0 0 0
Заперечення	NOT НЕ (ІНВЕРСІЯ)			0 1	– –	1 0

Назви логічних операцій вказують на умову одержання результату при співставленні двох бінарних комбінацій:

- операція «І» – результат співставлення «1», якщо у відповідних розрядах *i* в одній *i* в другій бінарних комбінаціях є символи «1»;
- операція «АБО» – результат співставлення «1», якщо у відповідних розрядах хоча б однієї бінарної комбінації (*або* однієї *або* другої) є символ «1»;
- \oplus (додавання по модулю два) – результат співставлення «1», якщо у відповідних розрядах тільки однієї з двох бінарних комбінацій є символ «1»;
- операція «НЕ» – інвертує символи даної комбінації;

ТИПИ ЛОГІКИ

Додатна логіка – логічний «1» відповідає високий рівень напруги; логічному «0» – низький рівень напруги.

Від'ємна логіка – логічний «1» відповідає низький рівень напруги; логічному «0» – високий рівень напруги.

Типи логіки відносяться до шин (кодів).

Одиночні сигнали (імпульси) називаються додатними (одичними) або від'ємними (нульовими).

Принцип двоїстості булевої алгебри полягають в тому, що один і той же ЛЕ в позитивній логіці виконує одну функцію, а в негативній – іншу (наприклад, ЛЕ І в негативній логіці буде елементом **АБО**).

Знак «=» в булевій алгебрі означає не кількісну рівність, а те, що вирази, розділені ним, ідентичні, тобто ліву частину виразу можна замінити правою і навпаки. Дужки, як і в звичайній алгебрі, вказують на порядок виконання операцій. У цифрових логічних схемах дужки визначають порядок розташування ЛЕ від входу до виходу. Якщо дужок немає, то спочатку виконується заперечення над окремими змінними, потім логічне множення і, нарешті, логічне додавання. Знак заперечення над сукупністю букв і знаків операцій означає, що операція заперечення для всієї сукупності виконується в останню чергу.

7.3. Двійково-десяткові коди.

Широкого застосування набули двійково-десяткові коди (ДДК). У двійково-десятковому коді кожна цифра десятичного числа записується чотирирозрядним двійковим кодом, наприклад, $436_{10} = 0010001101 10_{2-10}$.

Чотирма розрядами двійкового коду можна зобразити шістнадцять комбінацій нулів і одиниць, тобто всі цифри від нуля до п'ятнадцяти. У ДДК використовується лише 10 із них, а 6 інших є надмірними. Надмірність шести комбінацій дозволяє створити багато варіантів побудови ДДК

Припустімо, що кожен десятикову цифру зображуємо двійковим числом

$$A_2 = \sum_{i=1}^4 a_i q_i, \quad (7.4)$$

де a_i дорівнює 0 або 1;

q_i – ваговий коефіцієнт відповідного розряду.

Для кодування всіх цифр від 0 до 9 необхідно, щоб виконувалась умова

$$\sum_{i=1}^4 q_i \geq 9$$

Таблиця 7.4. Двійково-десяткові коди.

Види ДДК							
q_4	q_3	q_2	q_1	q_4	q_3	q_2	q_1
8	4	2	1	3	3	2	1
7	4	2	1	6	2	2	1
6	4	2	1	5	2	2	1
5	4	2	1	4	2	2	1
4	4	2	1	6	3	3	1
7	3	2	1	5	3	1	1
6	3	2	1	4	3	1	1
5	3	2	1	5	2	1	1
4	3	2	1	2	4	2	1

Широковживані ДДК		
N_{10}	Код 8421	Код 2421
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0010
3	0011	0011
4	0100	0100
5	0101	1011
6	0110	1100
7	0111	1101
8	1000	1110
9	1001	1111

ДДК будуються з виконанням наступних умов

- $q_4 q_3 q_2 q_1$ – розряди двійкового коду;
- вага найменшої значущої цифри $q_1 = 1$;

- вага $q_2 = 1$ або 2 ;
- вага $q_3 + q_4 \geq 7$, якщо $q_2 = 1$;
- вага $q_3 + q_4 \geq 6$, якщо $q_2 = 2$;
- $q_4 - (q_1 + q_2 + q_3) \leq 1$.

Отже, з виконанням зазначених умов можна створити коди наведені, в таблиці 7.4. Найбільшого застосування отримали так звані натуральний двійково-десятковий код 8421 і самодоповнючий код 2421 (код Айкана).

7.4. Характеристики кодів.

При вивченні двійково-десяткових кодів виявилась одна з властивостей кодів – надмірність. Отже, двійкові коди можна поділити на дві групи – ті, в яких використовуються всі можливі комбінації і ті, в яких використовуються тільки частина комбінацій. Перші називаються **ненадмірними**, а другі – **надмірними**. Надмірність коду є засобом підвищення його завадостійкості. В надмірних кодах використовується лише частина всіх можливих комбінацій, які є дозволеними. Інші комбінації, які не використовуються в даному коді, є забороненими. Залишкова частина комбінацій у надмірних кодах використовується для виявлення і виправлення помилок, що виникають при передаванні інформації. Крім кодів з надмірною кількістю комбінацій існують коди з надмірною кількістю розрядів. У таких надмірних кодах кількість розрядів кодової комбінації можна умовно поділити на розряди, у яких розміщена корисна інформація (інформаційні розряди) і розряди, призначені для виявлення і виправлення помилок (перевірочні розряди).

Коди, у яких кожному числу, що передається, відповідає кодова комбінація або блок з постійною кількістю символів, називаються **блочними**.

Надмірні коди, у яких відповідні розряди кодових комбінацій використовуються для інформаційних і перевірочних символів, називаються **подільними**. Неподільні коди не мають чіткого поділу на групи інформаційних і перевірочних розрядів.

Подільні блочні коди, у яких перевірочні символи визначаються проведенням лінійних операцій над відповідними інформаційними символами (складання за модулем 2) називаються **систематичними** (код Хеммінга).

Різновидом подільних блочних кодів є циклічні коди, які отримують так звану циклічну перестановку символів. Циклічна перестановка здійснюється зсувом всіх розрядів на один розряд ліворуч. При цьому крайній лівий символ переноситься на кінець комбінації (код Грея).

Коди мають наступні характеристики:

Основа коду – m , число різних цифр, літер, символів, з яких будується код.

Для двійкових кодів $m = 2$.

Довжина коду – m , число розрядів, які складають кодову комбінацію.

Повне число кодових комбінацій $N = m^n$ – повна кількість всіх можливих комбінацій. Для двійкових кодів $N = 2^n$.

$$N = 2^k$$

Потужність коду N_p – число кодових комбінацій, що використовуються

для передавання інформації. Для двійкових кодів $N = 2^k$, де k – число інформаційних розрядів.

Число перевірочних розрядів – $r = n - k$.

Абсолютна надмірність коду дорівнює r .

Відносна надмірність коду $R = 1 - \frac{\log_m N_p}{\log_m N}$. Для подільних блочних кодів

відносна надмірність дорівнює $R = 1 - \frac{k}{n} = \frac{r}{n}$.

Кодова відстань d між кодовими комбінаціями – число відповідних розрядів з різними символами, вага суми за модулем 2 двох кодових комбінацій.

7.5. Завадостійке кодування. Двійкові коди з виявленням помилок.

Цей код дозволяє виявляти однократні помилки у прийнятій кодовій комбінації.

Кратністю помилки називають число спотворених розрядів у кодовій комбінації.

В звичайних умовах, коли в каналах зв'язку не створюються штучні завади, ймовірність помилки незначна, а ймовірність багатократних незалежних помилок дуже мала. Тому в звичайних умовах найчастіше застосовують коди, які дозволяють виявляти або виявляти і виправляти однократні помилки. Таким кодом є код з однією перевіркою парності. Цей код, незалежно від довжини кодової комбінації, має один перевірочний символ. Цей символ вибирається таким (0 або 1), щоб його сума за модулем 2 з усіма інформаційними символами дорівнювала нулю. Усі числа від 0 до 15 у цьому коді запишемо в таблицю 7.5. Ознакою спотвореної комбінації є непарність у прийнятій комбінації. Даний код дозволяє виявити тільки однократні помилки непарної кратності.

Кореляційний код або код з подвоєнням елементів. Цей код також є різновидом кодів з простим повторенням. Цей код характеризується введенням додаткових символів для кожного розряду інформаційної частини. Так, якщо в розряді інформаційної частини стоїть 0, то в кореляційному коді записується 01, якщо 1 – то 10. Наприклад, комбінація 10101 в кореляційному коді виглядає як 1001100110. Ознакою спотворення є поява в парах елементів сполучень виду 00 або 11.

Інверсний код (код Бауера) також є різновидом коду з повторенням. Його відмінністю від коду з простим повторенням є те, що коли вихідна комбінація має парне число одиниць, друга комбінація є точно такою ж. Якщо вихідна комбінація має непарне число одиниць, повторення здійснюється в інвертованому виді. Наприклад, комбінації 011000 і 10101 інверсним кодом будуть записані 0110000011000 та 1010101010.

Кодову комбінацію перевіряють у наступній послідовності. Спочатку складають одиниці першої комбінації. Якщо їх число є парним, елементи додаткової комбінації приймають у незмінному виді. Після того обидві комбінації порівнюються поелементно і при виявленні неспівпадіння комбінація бракується. Якщо ж кількість одиниць першої комбінації непарна, елементи другої комбінації приймаються в інвертованому виді. Потім першу і другу комбінації порівнюють поелементно.

Потужність коду $N = 2^{n/2}$, надмірність – 0,5.

Код Грея. Простий позиційний двійковий код має таку властивість: при переході від числа до наступного числа змінюється інформація відразу у кількох розрядах. Так при переході від числа 0111 до 1000 (від 7 до 8), від 01111 до 10000 і т.д. спостерігаємо цю властивість. При аналого-цифровому перетворенні механічних величин (АЦП «кут – код») ця властивість спричиняє похибки зчитування інформації. Для виключення цих похибок застосовують так званий рефлексний код, або код Грея. Перевага коду Грея полягає у тому, що при переході від одного числа до наступного зміна інформації відбувається тільки в одному розряді. Алгоритм переведення числа з двійкового коду в код Грея.

Під двійковим числом записати те саме, зсунуте на 1 розряд праворуч (молодший розряд втрачається). Скласти числа за модулем 2. Результат є тим самим числом у коді Грея.

АЛГОРИТМ ПЕРЕВОДУ ЧИСЛА З КОДУ ГРЕЯ У ДВІЙКОВИЙ КОД.

Цифра старшого розряду не змінюється, кожна наступна цифра інвертується стільки разів, скільки одиниць у коді Грея стоїть перед нею.

Приклади наведені у таблиці 7.5.

Таблиця 7.5. Відповідність чисел у двійковому коді, коді Грея і інших завадостійких кодах.

N_{10}	Позиційний ДК	Код Грея	Код з перевіркою парності	Кореляційний код
0	0000	0000	00000	01010101
1	0001	0001	00011	01010110
2	0010	0011	00101	01011001
3	0011	0010	00110	01011010
4	0100	0110	01001	01100101
5	0101	0111	01010	01100110
6	0110	0101	01100	01101001
7	0111	0100	01111	01101010
8	1000	1100	10001	10010101
9	1001	1101	10010	10010110
10	1010	1111	10100	10011001
11	1011	1110	10111	10011010
12	1100	1010	11000	10100101
13	1101	1011	11011	10100110
14	1110	1001	11101	10101001
15	1111	1000	11110	10101010

Характерні властивості коду Грея.

1. Кожна наступна комбінація відрізняється від попередньої тільки в одному розряді.

2. Зміна значень елементів у розрядах:

1-й – після 0 11-00-11-00 і т.д.

2-й – після 1 1111-0000-1111-0000 і.т.д.
 3-й – після 3 11111111-00000000 і. т.д.
 4-й – після 7 1111111111111111-0000000000000000 і т.д.

і т.д. у відповідності з алгоритмом.

3. При складанні двох сусідніх комбінацій за модулем 2 число одиниць дорівнює $n - 3$, де n – число розрядів.

Недоліком коду Грея є його непозиційність. Тому його використовують тільки для зчитування інформації та передавання, а для її обробки числа з коду Грея переводять у звичайний двійковий код.

7.6. Коди з виправленням помилок.

Код Хеммінга – код з виправленням помилок. Код Хеммінга належить до систематичних кодів, при $d_{\min} = 3$ код Хеммінга виявляє і виправляє однократні помилки, а при $d_{\min} = 4$ цей код дозволяє виправити однократні та виявити подвійні помилки.

Довжина коду Хеммінга – $n \leq 2^r - 1$. Звідси отримуємо ще два співвідношення:

$$\begin{aligned} 2^r - 1 - r &\geq k; \\ 2^r &\leq \frac{2^n}{1+n}, \end{aligned} \quad (7.5)$$

яким повинен відповідати код Хеммінга. Остання нерівність дозволяє визначити довжину коду при заданому числі інформаційних розрядів.

Якщо число закодоване кодом Хеммінга, то в результаті певної кількості перевірок прийнятої кодової комбінації отримують код номера спотвореного розряду.

Алгоритм обробки прийнятої комбінації в коді Хеммінга.

1. Кількість перевірок дорівнює числу перевірочних розрядів r .
2. Всі перевірки зводяться до обчислення суми за модулем 2 відповідних розрядів.
3. При першій перевірці вибираються розряди 1, 3, 5, 7, 9, 11 і т.д.

$$S_1 = U_1 \oplus U_3 \oplus U_5 \oplus U_7 \oplus U_9 \oplus \dots \oplus U_e = 0$$

За цією формулою знаходимо U_1 .

За подібним алгоритмом знаходимо U_2, U_4, U_8, U_{16} і т.д.:

4. При другій перевірці вибираються розряди, номери яких мають одиницю у другому розряді двійкового коду, тобто 2, 3, 6, 7, 10, 11, 14, 15 і т.д.

$$S_2 = U_2 \oplus U_3 \oplus U_6 \oplus U_7 \oplus U_{10} \oplus \dots \oplus U_e = 0$$

5. При третій перевірці вибираються розряди, номери яких мають одиницю у третьому розряді, тобто розряди 4, 5, 6, 7, 12, 13 і т.д.

$$S_3 = U_4 \oplus U_5 \oplus U_6 \oplus U_7 \oplus U_{12} \oplus \dots \oplus U_e = 0$$

6. При четвертій перевірці вибираються розряди, номери яких мають одиницю у четвертому розряді, тобто розряди 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 і т.д.

$$S_4 = U_8 \oplus U_9 \oplus U_{10} \oplus U_{11} \oplus U_{12} \oplus \dots \oplus U_e = 0$$

7. Перевірочні символи в кодї Хеммінга зручно розміщувати в розрядах, номери яких є степенем числа 2, тобто в розрядах 1, 2, 4, 8 і т.д.

Для прикладу у таблиці 7.3 наведені числа від 0 до 15 у кодї Хеммінга.

1. Перевірочні символи стоять в розрядах 1, 2, 4.

2. Спочатку записуємо символи інформаційних розрядів.

3. Далі знаходимо символи U_1 , U_2 , U_4 , і записуємо їх у відповідних розрядах.

Таблиця 7.6.

N_{10}	N_2	Код Хеммінга						
		1	2	3	4	5	6	7
0	0000	0	0	0	0	0	0	0
1	0001	1	1	0	1	0	0	1
2	0010	0	1	0	1	0	1	0
3	0011	1	0	0	0	0	1	1
4	0100	1	0	0	1	1	0	0
5	0101	0	1	0	0	1	0	1
6	0110	1	1	0	0	1	1	0
7	0111	0	0	0	1	1	1	1
8	1000	1	1	1	0	0	0	0
9	1001	0	0	1	1	0	0	1
10	1010	1	0	1	1	0	1	0
11	1011	0	1	1	0	0	1	1
12	1100	0	1	1	1	1	0	0
13	1101	1	0	1	0	1	0	1
14	1110	0	0	1	0	1	1	0
15	1111	1	1	1	1	1	1	1

7.7. Оптимальний код Шеннона-Фено.

Одне і те саме повідомлення можна закодувати різними способами. Виникає задача оптимального кодування. **Оптимальним** вважають такий код, при якому на передавання повідомлення витрачається мінімум часу.

Якщо на передачу одного символу 0 або 1 витрачається один і той же час, то оптимальним буде код, в якому комбінації записані найменшою кількістю символів. Такий код для кодування повідомлень англійською абеткою був розроблений Шенноном і Фено і носить назву коду Шеннона-Фено.

Побудуємо код Шеннона-Фено для російської абетки. Задача полягає у тому, щоб закодувати двійковим кодом літери російської абетки таким чином, щоб кожній літері російської абетки відповідала комбінація 0 і 1, і щоб середня кількість символів на одну літеру тексту була мінімальною.

Розглядаємо літери української абетки і знак „-” (пропуску між словами), всього 34 знаки. Найпростіше було б занумерувати всі знаки підряд, від 0 до 34 і записати номери війковим кодом. Але такий код не буде оптимальним у сенсі довжини повідомлення. Доцільним буде літери, які вживаються частіше, кодувати

меншим числом розрядів, а ті літери, які вживаються найрідше, більшою кількістю розрядів. Для реалізації такого коду потрібно знати відносні частоти вживання літер у змістовних текстах. Такі відомості наведені у таблиці 7.7.

Таблиця 7.7. Відносні частоти вживання літер української абетки.

Літера	Частота	Літера	Частота	Літера	Частота	Літера	Частота
„-”	0,138	Р	0,043	П	0,025	Ї	0,010
О	0,086	Е	0,042	З	0,020	Ц	0,010
Н	0,068	С	0,037	Я	0,019	Й	0,009
А	0,064	К	0,033	Ь	0,016	Ю	0,008
И	0,055	М	0,029	Б	0,013	Ж	0,007
В	0,046	У	0,027	Г	0,013	Ш	0,005
Т	0,045	Д	0,027	Ч	0,011	Є	0,005
І	0,044	Л	0,027	Х	0,011	Щ	0,004
						Ф	0,003
Частота повторюваності букви Г в текстах українською мовою дорівнює $6 \cdot 10^{-5}$.							

Користуючись цією таблицею можна скласти найбільш економічний код, який би меншою кількістю символів відобразив певну кількість інформації. Розглянемо елементарні символи 0 і 1 як систему з двома можливими станами. Інформація, яку подає один з цих символів дорівнює ентропії системи і максимальна, якщо поява того чи іншого символу подія рівновірогідна. В цьому випадку 1 символ передає інформацію 1 біт. Тому основною вимогою, яка повинна виконуватись при складанні оптимального коду є те, щоб елементарні символи зустрічались у закодованому тексті однаково часто. Ідея побудови коду Шеннона-Фено полягає у наступному. Всі знаки, які треба закодувати двійковим кодом, ділять на 2 приблизно рівновірогідні групи. Для першої групи знаків на першому місці комбінації (праворуч) записують 0, а для другої – 1. Потім кожна група ділиться приблизно на дві приблизно рівновірогідні підгрупи і для першої підгрупи на другому місці пишуть 0, для другої підгрупи – 1 і т.д., поки поділ у кожній підгрупі не дійде до одного знаку. Покажемо ці операції на прикладі.

Відрахуємо перших сім літер (від «-» до „Т”) і складемо їх частоти, отримаємо 0,502. На всі інші літери (від «І» до «Ф») залишається сума, що приблизно дорівнює 0,498. Перші сім літер матимуть на 1-му місці символ 0, а всі інші – символ 1. Далі ділимо першу групу літер на дві підгрупи із приблизно рівними ймовірностями (частотами). Перша підгрупа має два знаки «-» і «О», друга – п'ять літер від «Н» до «Т» та частоти 0,224 і 0,278 відповідно. Отже знаки «-» і «О» на другому місці мають символ 0, а літери «Н», «А», «И», «В», «Т» – на другому місці мають 1. Далі ділимо першу підгрупу на двоє. Отримуємо для знаку «-» третій символ 0, а для літери «О» – третій символ 1. Отримуємо код для знаку «-» **000**, а для літери «О» відповідно **001**. Продовжуючи поділ далі, отримуємо коди, зображені у таблиці 7.8.

При кодуванні цим кодом немає необхідності розділяти літери спеціальним знаком. Але будь-яка помилка, збій 1 на 0 або навпаки робить декодування неможливим.

Виникає питання, чи є розглянутий код дійсно оптимальним (крім умови відсутності помилки). Для відповіді на це питання знайдемо середнє значення

кількості інформації, яка припадає на 1 елементарний символ і порівнюємо з максимально можливою інформацією, яка в цьому випадку дорівнює 1 біту. Для

Таблиця 7.8. Кодування літер української абетки.

№ розряду Знаки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Код літери		
-	0	0	0							000		
О			1								001	
Н		1	1	0	0						0100	
А				1	1							0101
И				0	0							0110
В				1	1							0111
Т		0	0	0	0						1000	
І	1			1							1001	
Р	1		1	0	0	0					10100	
Е				1	1	0						10101
С				0	0	1						10110
К				1	1	1						10111
М	1		0			0					11000	
У		0		0	1	0					110010	
Д		1	1	0	0	1	0				110011	
Л				1	1	0	0					110100
П				0	0	1	1	0				110110
З				1	1	1	1					110111
Я		1	1	0	0	0	0				111000	
Ь	1			1	0	1					111001	
Б	0			0	1	0					111010	
Г	1			1	1	1					111011	
Ч	1	0			0	0				111100		
Х			0	0	1	0					1111010	
Ї		1	1			1	1				1111011	
Ц				0	0	0	0					1111100
Й				1	1	0	1					1111111
Ю		1	1	1	1			0	0		11111100	
Ж				1	1	1	1	0	1			11111101
Ш	1			1	1	1	1	0	0		11111110	
Є	1			1	1	1	1	1	1		11111111	
Щ	1	0							0	111111100		
Ф			1							1	111111101	

Частота повторюваності букви Г в текстах українською мовою дорівнює $6 \cdot 10^{-5}$.

цього знайдемо ентропію на 1 знак системи

$$H(зн) = -\sum_{i=1}^{34} p_i \log_2 p_i = \sum_{i=1}^{34} \xi(p_i);$$

$$H(зн) = \xi(0,138) + \xi(0,086) + \dots + \xi(0,004) + \xi(0,003) = 4,536 \text{ біт}$$

З таблиці знайдемо середнє число елементарних символів на букву

$$n_{cp} = 3 \cdot 0,138 + 3 \cdot 0,086 + 4 \cdot 0,068 + \dots + 9 \cdot 0,004 + 9 \cdot 0,003 = 4,584$$

Середня кількість інформації, що передається одним елементом

$$I_{1cp} = \frac{H(зн)}{n_{cp}} = \frac{4,536}{4,584} \approx 0,9894 \text{ біт}.$$

Отже $I_{1cp} \approx 1$ біт.

Якби ми закодували кожну літеру її номером у абетці (від 0 до 34), то кожна літера мала би шість двійкових розрядів, і тоді

$$I_{1cp} = \frac{4,536}{6} \approx 0,7559 \text{ біт},$$

тобто питомий вміст інформації був би дещо менший.

Контрольні запитання і задачі.

1. Розкрийте поняття позиційної системи числення. Порівняйте десяткову і війкову системи числення. Переваги і недоліки двійкової системи.
2. Визначення кодування. Кодування десяткових комбінацій бінарним кодом. Алгоритми кодування і декодування.
3. Двійково-десяткові коди і їх застосування. Правила утворення ДДК. Надмірність ДДК.
4. Характеристики кодів, класифікація кодів.
5. Циклічні коди. Код Грея, його властивості та область застосування.
6. Коди з виявленням помилок, код з перевіркою парності, кореляційний код.
7. Систематичні коди. Код Хеммінга, його властивості, правила побудови коду, алгоритм вибору перевірочних символів.
8. Алгоритм побудови оптимального коду Шеннона-Фено.

§ 8 Архівація даних.

8.1. Категорії програм архіваторів.

Надлишковість відіграє позитивну роль, оскільки завдяки їй повідомлення захищені від завад. Це використовують при завадостійкому кодуванні.

Цілком нормальний на вид лазерний диск може містити внутрішні (процес запису спряжений з появою різноманітних помилок) і зовнішні (наявність фізичних руйнувань поверхні диска) дефекти. Проте навіть при наявності фізичних пошкоджень поверхні лазерний диск може цілком нормально прочитуватися за рахунок надмірності даних, що зберігаються на ньому. Кориговальні коди С 1, С 2, Q і Р – рівнів відновлюють усі відомі приводи, а їх кориговальна здатність може

досягати двох помилок на кожний з рівнів C 1 і C 2 та до 86 і 52 помилок на рівні Q та відповідно. Але далі, при розростанні дефектів, коригувальної здатності кодів **РІДА-СОЛОМОНА** несподівано перестає вистачати, і диск без всяких видимих причин відмовляється прочитуватися чи взагалі не розпізнається приводом. Надмірність усувають побудовою оптимальних кодів, які вкорочують повідомлення порівняно з рівномірними кодами. Це використовують при архівації даних. Дію засобів архівації базується на використуванні алгоритмів стиску.

Сутність роботи архіваторів: вони знаходять у файлах надлишкову інформацію (пробіли та ділянки, що повторюються), кодують їх, а далі при розпаковуванні відновлюють вихідні файли по особливих відмітках.

Першим широке визнання одержав архіватор **Zip**.

З часом набули популярності інші програми: **RAR**, **ARJ**, **ACE**, **TAR**, **LHA** тощо.

В операційній системі Windows достатньо чітко окреслилися два лідери: **WinZip** (домашня сторінка цієї утиліти знаходиться в за адресом <http://www.winzip.com>) та **WinRAR**, створений російським програмістом **Євгенієм Рошалем** (домашня сторінка <http://www.rarlab.com>). Можна сказати, що **WinRAR** активно витісняє **WinZip** оскільки:

- зручний та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс;
- потужну але гнучку систему архівації файлів;
- високу швидкість роботи;
- щільніше стискує файли.

Обидві утиліти забезпечують сумісність з великою кількістю архівних форматів.

Окрім них до досить розповсюджених архіваторів можна долучити **WinArj** (домашня сторінка <http://www.lasoft-oz.com>); **Cabinet Manager** (підтримує формат **CAB**, розроблений компанією **Microsoft** для зберігання дистрибутивів своїх програм) і **WinAce** (працює з файлами, що мають розширення **ace** та де-якими іншими).

Необхідно згадати програми-оболонки **Norton Commander**, **Windows Commander** або **Far Manager**. Вони дозволяють шляхом налаштування файлів конфігурації підключати зовнішні DOS-архіватори командного рядка і організувати прозоре маніпулювання архівами, представляючи їх на екрані у вигляді звичайних каталогів. Завдяки цьому з допомогою комбінацій функціональних клавіш можна легко переглядати вміст архівів, видобувати файли з них та створювати нові архіви.

Хоч програми архівації, призначені для MS-DOS уміють працювати і під управлінням більшості версій Windows (у вікні сеансу MS-DOS), застосовувати їх у цій операційній системі недоцільно, оскільки при обробці файлів DOS-архіваторами їх імена врізуються до 8 символів, що далеко не завжди зручно, а в деяких випадках навіть протипоказано.

Вибираючи інструмент для роботи з архівами, насамперед слід враховувати як мінімум два фактори:

- ефективність (оптимальне співвідношення між економією дискового простору та продуктивністю роботи);
- сумісність (можливість обміну даними з іншими користувачами).

Враховуючи обчислювальну потужність сучасних персональних комп'ютерів часом опрацювання архівів можна знехтувати, а суттєвим залишається здатність

„розуміти” найрозповсюдженіші формати архіваторів.

Якість стиску файлів залежить від типу та надлишковості даних, що зберігаються в них. Наприклад, надлишковість відеоданих в декілька разів більша, ніж у графічних, а ступінь надлишковості графічних даних в декілька разів більший, ніж текстових. На практиці це означає, що зображення форматів **BMP** і **TIFF**, при переміщені в архів, зазвичай, зменшується в розмірі сильніше, аніж документи **MS Word**. А рисунки JPEG завчасно скомпресовані, тому навіть найкращий архіватор для них малоефективний. Незначно стискаються, також, виконавчі файли програм і архіви.

ТРИ КАТЕГОРІЇ ПРОГРАМ-АРХІВАТОРІВ.

1. Програми для стиску виконавчих файлів (при цьому файли вільно запускаються, але зміну їхнього вмісту, наприклад українізація, можлива тільки після розархівації).
2. Програми для стиску мультимедійних файлів, (після стиску файли вільно використовуються, хоча, зазвичай, при стиску їх формат (внутрішня структура) змінюється). Це може призвести до проблем з запуском.
3. Програми для стиску будь-яких видів файлів і каталогів, при цьому в основному використання стиснутих файлів можливе тільки після розархівації. Хоча є програми що „бачать” деякі типи архівів як звичайнісінькі каталоги, проте їм притаманна низка неприємних нюансів, наприклад перевантажують центральний процес, що є проблемою для „слабких машин”.

Принцип роботи архіваторів ґрунтується на пошуку у файлі „надмірної” інформації та подальшому її кодуванні з метою одержання мінімального об’єму. Найвідомішим методом архівації файлів є стиск послідовностей однакових символів. Наприклад, всередині файлу наявні послідовності байтів, що часто повторюються. Замість того, щоб зберігати кожний байт, фіксується кількість символів, що повторююся, та їхня позиція. Нехай файл, що архівується, займає 15 байт і складається з послідовності символів:

V V V V L L L L A A A A A

Заглянемо в таблицю 7.8. кодування **ASCII** (англ. *American standard code for information interchange*) кодування друкованих та недрукованих символів.

У шістнадцятковій системі

42 42 42 42 4C 4C 4C 4C 4C 41 41 41 41 41

Архіватор може представити цей файл наступним (шістнадцятковим) чином:

01 05 42 06 05 4C 0A 05 41

Це означає:

з першої позиції п’ять разів повторюється символ „V”;

з позиції шість п’ять разів повторюється символ „L”;

з позиції одинадцять п’ять разів повторюється символ „A”.

Для зберігання файлу в такій формі необхідно всього 9 байт, що на 6 байт менше вихідного.

Описаний метод є простим і дуже ефективним способом стиску файлів. Проте він не забезпечує великої економії об’єму, якщо текст, що обробляється, містить невелику кількість послідовності символів, що повторюються.

Таблиця 7.8. Кодування ASCII

Decimal	Hex	Char	Decimal	Hex	Char	Decimal	Hex	Char	Decimal	Hex	Char
0	0	[NULL]	32	20	[Space]	64	40	@	96	60	,
1	1	[START OF HEADIND]	33	21	!	65	41	A	97	61	a
2	2	[START OF TEXT]	34	22	"	66	42	B	98	62	b
3	3	[END OF TEXT]	35	23	#	67	43	C	99	63	c
4	4	[END OF TRANSMISSION]	36	24	\$	68	44	D	100	64	d
5	5	[ENQUIRY]	37	25	%	69	45	E	101	65	e
6	6	[ACKNOWLEDGE]	38	26	&	70	46	F	102	66	f
7	7	[BELL]	39	27	'	71	47	G	103	67	g
8	8	[BACKSPACE]	40	28	(	72	48	H	104	68	h
9	9	[HORIZONTAL TAB]	41	29	)	73	49	I	105	69	i
10	A	[LINE FEED]	42	2A	*	74	4A	J	106	6A	j
11	B	[VERTICAL TAB]	43	2B	÷	75	4B	K	107	6B	k
12	C	[FORM FEED]	44	2C	,	76	4C	L	108	6C	l
13	D	[CARRIAGE RETURN]	45	2D	-	77	4D	M	109	6D	m
14	E	[SHIFT OUT]	46	2E	.	78	4E	N	110	6E	n
15	F	[SHIFT IN]	47	2F	/	79	4F	O	111	6F	o
16	10	[DATA LINK ESCAPE]	48	30	0	80	50	P	112	70	p
17	11	[DEVICE CONTROL 1]	49	31	1	81	51	Q	113	71	q
18	12	[DEVICE CONTROL 2]	50	32	2	82	52	R	114	72	r
19	13	[DEVICE CONTROL 3]	51	33	3	83	53	S	115	73	s
20	14	[DEVICE CONTROL 4]	52	34	4	84	54	T	116	74	t
21	15	[NEGATIVE ACKNOWLEDGE]	53	35	5	85	55	U	117	75	u
22	16	[SYNCHRONOUS IDLE]	54	36	6	86	56	V	118	76	v
23	17	[END OF TRANS. BLOCK]	55	37	7	87	57	W	119	77	w
24	18	[CANCEL]	56	38	8	88	58	X	120	78	x
25	19	[END OF MEDIUM]	57	39	9	89	59	Y	121	79	y
26	1A	[SUBSTITUTE]	58	3A	:	90	5A	Z	122	7A	z
27	1B	[ESCAPE]	59	3B	;	91	5B	[	123	7B	{
28	1C	[FILE SEPARATOR]	60	3C	<	92	5C	\	124	7C	|
29	1D	[GROUP SEPARATOR]	61	3D	=	93	5D	]	125	7D	}
30	1E	[RECORD SEPARATOR]	62	3E	>	94	5E	^	126	7E	~
31	1F	[UNIT SEPARATOR]	63	3F	?	95	5F	_	127	7F	[DEL]

Вишуканий метод стиску даних, що використовується в тому чи іншому виді практично будь-яким архіватором, – це так званий оптимальний префіксний код і, зокрема, кодування символами змінної довжини (алгоритм Хаффмана).

Код змінної довжини дозволяє записувати символи, що найчастіше зустрічаються та групи символів всього лише кількома бітами, тоді як рідкі символи та фрази будуть записані довгими бітовими рядками. Наприклад, в будь-якому українському тексті літера **А** зустрічається частіше, ніж літера **Б**, а **Й** та **Ї** відносяться до найрідших. Таким чином, використовуючи спеціальну таблицю відповідності, можна закодувати кожну літеру **А** меншим числом бітів і використовувати довший код

для рідших літер.

Популярні архіватори **ARJ**, **PAK**, **PKZIP** працюють на основі **алгоритму Лемпела-Зіва**. Ці архіватори класифікуються як адаптивні словарні кодувальники, в яких текстові рядки замінюються вказівниками на ідентичні їх рядки, що зустрічаються раніше в тексті. Наприклад, всі слова будь-якої книги можуть бути представлені у вигляді номерів сторінок і номерів рядків деякого словника. Найважливішою відмінною рисою цього алгоритму є використання граматичного аналізу попереднього тексту з розділенням його на фрази, що записуються в словник. Якщо відповідність виявлено, то поточна фраза замінюється вказівником на свого попереднього двійника.

При архівації, як і при компресії, степінь стиску файлів дуже залежить від формату файлу. Графічні файли, типу **TIF** і **GIF**, вже завчасу компресовані (хоча існує різновид формату **TIFF** і без компресії), і тут навіть найкращій архіватор мало що знайде для упаковки. Зовсім інша картина спостерігається при архівації текстових файлів, файлів **PostScript**, файлів **BMP** та їх подібним.

8.2. Графічні формати для збереження зображення.

Всі зображення в комп'ютері зберігаються в тому чи іншому графічному форматі (понад 50 видів). Кожний з них має свої особливості. Якщо працюють з графікою чи користуються цифровим фотоапаратом, то вибір правильного формату багато в чому визначає якість роботи.

Всі графічні формати діляться на дві великі групи: растрові та векторні.

Файли першої з них містять опис кожної точки зображення (представлені у вигляді матриці (bitmap), що складається з маленьких квадратиків різного кольору – пікселів). Найрозповсюдженішими форматами цієї групи є **GIF** і **JPEG**, що використовуються в Інтернеті, а також **BMP** (стандартний формат Windows) та **TIFF**, який використовується при зберіганні відсканованих зображень а також в поліграфії. У растровому форматі зберігаються фотографії, рисунки і заставки Робочого стола. Відео також є послідовністю растрових зображень.

Файли векторних форматів містять не растрові точки, як у фотознімка, а математичні формули, що описують координати ліній. Наприклад, пряма представлена координатами двох точок, а коло – координатами центру та радіуса, тому досягається дуже малий розмір файлу. Векторні графічні формати використовують для передачі схем і рисунків, що складаються з набору ліній, описаних математичними формулами. У векторних форматах зберігаються логотипи, схематичні рисунки, текст, що призначений для виводу на друк та інші подібні об'єкти.

Стандартними засобами перетворити фотозображення у векторний формат практично неможливо, оскільки для цього потрібні спеціальні програми – конвертори. Найрозповсюдженішими розширеннями векторних файлів є: **AI** для пакета **Adobe Illustrator**; **CDR** для пакета **CorelDRAW** і **WMF** (ще один «стандартний» формат Windows).

На сьогоднішній день застарілими є формати **PCX** та **TIFF**. Незабаром нерациональним вважатиметься і формат **GIF**.

Формат BMP

BMP (Windows Device Independent Bitmap) – це один з найстаріших форматів, до того ж є ще й «рідним» форматом. Основна область застосування BMP – зберігання файлів, що використовуються всередині операційної системи (наприклад, шпалер для Робочого стола). Файл, збережений в цьому форматі, прочитується будь-яким графічним редактором. Файли, збережені в BMP, можуть містити як 256 кольорів, так і 16700000 відтінків. BMP – найпростіший (якщо не сказати примітивний) графічний формат. Записаний в ньому файл є масивом даних, що містять інформацію про колір кожного пікселя, тобто зображення розміром 1024x768 точок з глибиною кольору 24 біти буде займати $1024 \times 768 \times 3 = 2359296$ байт (без врахування службової інформації про об'єм та ім'я файлу, що становить ще кількасот байт).

Основний недолік формату, що обмежує його застосування, – великий розмір BMP-файлів. Звичайно, можна спробувати зберегти зображення у форматі BMP з стиском, проте це часто викликає проблеми при роботі з низкою графічних пакетів. Навіть при сучасній місткості жорстких дисків зберігати колекцію графічних файлів обтяжливо. Та й передача графіки у форматі BMP мережею (у всякому випадку без стиску з допомогою різноманітних архіваторів) – не просто.

Формат GIF

GIF (Graphic Interchange Format) – графічний формат, що дозволяє ефективно стискати зображення з глибиною кольору до 8 біт, розроблений для передачі растрових зображень мережею.

Завдяки наявності альфа-каналу (де зберігається маска прозорості) та анімації (тобто в один файл можна помістити кілька зображень, що можуть почергово змінюватися через заданий проміжок часу) формат набув популярності.

Файли містять інформацію у стисненому виді, що дозволяє відчутно зменшити їх розмір, особливо якщо в них є зафарбовані одним кольором великі ділянки. Такі зображення зустрічаються в оформленні інтернет-сайтів (хоч останнім часом все більше дизайнерів віддають перевагу технології **Flash**).

Інша перевага формату **GIF** – черезрядкова розгортка (при завантаженні зображення спочатку видно першу, п'яту, десятую і т.д., а потім – друга, шоста, одинадцята, що створює ефект поступового проявлення зображення на екрані).

Область застосування **GIF** – зображення з різкими кольоровими переходами та бізнес-графіка (логотипи, кнопки, елементи оформлення тощо).

Недолік **GIF** – специфіка стиску інформації: порядковий запис даних про зображення, внаслідок чого всі операції здійснюються з масивом рядків висотою в один піксель (кожний рядок обробляється окремо) і, як наслідок, вкрай неефективний стиск фотографій та будь-яких зображень з малою кількістю однотонних областей. Крім того, 8-бітне зображення може містити не більше 256 кольорів.

Формат JPEG

JPEG (Joint Photographic Experts Group) є на сьогоднішній день найпопулярнішим завдяки однойменному алгоритму стиску.

Оригінальність стиску полягає в тому, що відшукуються не однакові пікселі, а

обчислюється різниця між сусідніми квадратами розміром 9x9 пікселів. Інформація, що не заслуговує уваги, відкидається, а низка одержаних значень усереднюється. В результаті одержують файл в десятки або сотні разів меншого розміру, ніж BMP. Зрозуміло, що чим вищий рівень компресії, тим нижча якість.

Слід зауважити: якщо файл обробляється в графічному редакторі, то зберігати його в JPEG потрібно тільки після виконання всіх редагувань. В протилежному випадку з кожним збереженням його якість буде погіршуватися (аж до «розмиття» зображення).

У цьому форматі найкраще зберігати фотографії та подібні до них зображення. Скріншоти, схеми та креслення краще зберігати у форматі TIFF, оскільки при зберіганні у форматі JPEG неодмінно з'являються завади та «шуми».

Процес обробки графічної інформації алгоритмом JPEG дуже нагадує стиск звукових даних у форматі MP3:

1. Вихідне зображення ділиться на блоки розміром 16x16 пікселів. Подальші операції виконуються над кожним з них окремо, що дає суттєвий вигравш у швидкості (порівняно з тим випадком, коли зображення обробляється як єдиний масив).
2. Перехід до найкращого для стиску способу представлення кольорів. Звична модель RGB переводиться в YCbCr, де Y – сигнал яскравості, а Cb та Cr – насиченість синього і червоного відповідно. Такий спосіб представлення кольорів буде кращим і з точки зору сприйняття людським оком. Як відомо, зорова інформація сприймається з допомогою сенсорів двох типів: паличок та колбочок. Перші аналізують складову яскравості зображення, другі – колір. Паличок у 20 разів більше, ніж колбочок, і, як наслідок, око більш чутливе до зміни яскравості, ніж кольору.

Якщо врахувати цю особливість людського зору, то з матриць значень насиченості синього і червоного слід відкидати всі парні рядки і стовпці. Таким чином втрачається 75% інформації про розподіл кольорів. Матриця відліків про яскравість не змінюється, а ділиться на чотири частини, створюючи блоки 8x8.

3. Виконується дискретне косинусне перетворення (Discrete Cosine Transform, DCT), запропоноване В. Ченом в 1981 р. Воно подібне до перетворення Фур'є, тільки у DCT дещо нижча ймовірність виникнення помилки. Застосування цього чисто математичного прийому пояснюється тим, що в реальних зображення сусідні блоки достатньо подібні (коефіцієнт кореляції – 0,90 – 0,98). DCT перетворює інформацію про колір і яскравість кожного пікселя в інформацію про швидкість зміни цих величин. Ці перетворення є зворотними, а це означає, що за новою матрицею може бути відновлено вихідна з точністю до похибки даного методу. DCT дозволяє значно скоротити об'єм даних і розмір одержуваного файлу.

В результаті DCT графічні зображення описуються двомірною функцією, що показує швидкості зміни яскравості та кольору. До того ж для більшості фотографій характерні плавні, м'які переходи цих параметрів на сусідніх ділянках. Як вияснили дослідження, для коректного сприйняття таких зображень окрім важливіших низькочастотних компонентів матриці (плавні переходи), а високочастотні (різка зміна

відтінків і яскравості) вже не настільки суттєві. Тому останні кодуються з меншою детальністю, а при перевищенні певної порогової величини, що залежить від вибраної якості стиску, взагалі прирівнюються до нуля. Отже, при кодуванні файлів з низькою якістю різкі кольорові переходи змазуються, а зображення стає дещо мозаїчним.

4. Кодування одержаних величин методом Хаффмана – останній етап. Воно полягає в присвоюванні часто повторюваних елементів інформації, що оброблюється, найкоротших кодових послідовностей, а тих, що зустрічаються рідше – довгими.

Внаслідок цього розмір файлу, що одержуємо, дещо зменшується.

Такий досить складний алгоритм стиску графічної інформації дозволив формату JPEG обробляти фотографічні зображення з більшою ефективністю і непоганою якістю. Проте область застосування даного формату обмежується фотографіями.

Формат PNG

PNG (Portable Network Graphics) володіє високим стиском практично для будь-яких зображень шляхом трансформації у вид, що найприйнятніший для обробки.

Наявність досконалішого альфа-каналу (число рівнів доведено до 254, з варіацією прозорості від 0 до 100%) перетворює його у потужний засіб для веб-дизайнерів.

Іншими перевагами є:

- «черезточкове» представлення розгортки (зображення відображається не крупними рядками, а великими точками);
- гамма-коригування (співвідношення між цифровою інформацією та реальними кольорами на моніторі називається гамою) важлива при перенесенні зображення з одного комп'ютера на інший, особливо якщо на них встановлені різні ОС чи вони побудовані на різних платформах.

Формат TIFF

TIFF (Tagged Image File Format) використовується у видавництвах, оскільки у ньому немає втрат якості. Цей формат підтримують практично всі програми як ПК, та і Macintosh.

Формат забезпечує середній ступінь стиску. Якість вимагає більший об'єм файлів. Проте якщо цифрові фотографії в подальшому оброблятимуться у Photoshop, то зберігати їх слід у TIFF.

Формат RAW

RAW («сирий») – зображення записується як послідовність байтів, що містять інформацію про кожний піксель. Кольорові значення описуються у шістнадцятковому форматі, де 0 = чорний, а 255 = білий. Зрозуміло, що об'єм файлів при цьому величезний. Такий спосіб запису компенсує налаштування апаратури (наприклад, фотокамери), дозволяючи отримати зображення, що максимально наближене до оригіналу.

Кодек – програма для кодування/декодування потоку даних.

8.3. Характеристики відеофайлів та відеоплеєрів.

ФОРМАТ MPEG-4

MPEG-4 (Motion Picture Experts Group) – назва групи експертів, аббревіатура якої дала назву сучасним стандартам, а також розширення багатьом іншим відео файлів. Це найпопулярніший стандарт для запису DVD-фільмів та дисків з фільмами у форматі DivX, а RealVideo використовується для живої телевізійної трансляції в Інтернеті (більшість відео файлів стиснуті з використанням стандарту MPEG-4).

Формати, що використовуються в Інтернеті (найрозповсюдженіший – RealVideo), не великі за розміром та низької якості. Це дозволяє не завантажувати канал зв'язку, наприклад, випуском теленовін.

Наявність сучасного програмного відеоплеєра – запорука успішного перегляду відеофайлів на комп'ютері. Встановлення двох-трьох плеєрів (окрім Media Player, що встановлюється Windows по замовчуванню) забезпечує гарантоване відтворення відеофайлів різних типів, оскільки політика деяких розробників робить їх формати в інших програмах недоступні.

Програмний відеоплеєр **Real Player** (власний формат компанії RealNetworks) відтворює тільки дані у форматі RealVideo та RealAudio (файли з розширенням RM, RA, RAM, MPG, MPEG, AVI, FIX, MPG, MPEG, MP1, MK та ін.) використовує дуже високу ступінь стиску відео для прямої трансляції в Інтернеті.

Формат компресії **DivX** (технологія компресії від DivXNetworks) – модифікація MPEG-4, застосовує високу ступінь компресії з задовільною якістю.

Формат компресії **Windows Media** (власний формат файлів Microsoft) – аналогічний MPEG-4.

Програмний відеоплеєр **Windows Media Player** – типи відтворюваних файлів WMV, ASF, AVI.MPEG, MPG, IVF, M1V, MP1, MP2, VOB та ін.

Програмний відеоплеєр **Quick Time Player** – типи відтворюваних файлів QT, MOV, PNG, AVI, FIX, MPG, MPEG, MP1, MK та ін.

У комплекті Windows є програмний пакет для домашнього відеомонтажу Movie Maker. Він реалізовує всі основні етапи роботи з цифровим відео: захват, монтування та зберігання (відправку в Інтернет) відеофайлів.

Firewire – стандарт обміну даними між перефійними пристроями.

Відеомонтаж – програмна обробка відеоматеріалу.

Захват відеосигналу – перенос аналогового або цифрового сигналу на жорсткий диск ПК.

8.4. Кодування звуку.

На основі MPEG створений стандарт стиску звуку MPEG 1.0 Audio Layer III, що в подальшому став відомим як MP3. Пошуки способу безкоштовного використання алгоритмів кодека спричинили появу кодека Lame, що згодом набув популярності.

Особливість кодека **Lame** – акцент на покращенні алгоритму спеціальної психоакустичної моделі, принцип якої базується видаленні зі звукового файлу тих частот, котрі людське вухо не сприймає.

При кодуванні цифрового звуку (файли з розширенням WAV) основним параметром, що впливає на якість результату, є величина **бітрейта**.

Якщо використовувати максимальне значення цього параметра, то звук максимально відповідатиме оригіналу. До 2000 року широко застосовувалось значення бітрейта 128 Кбіт/с, а пізніше (внаслідок росту пропускної здатності сучасних каналів зв'язку) найрозповсюдженіший бітрейт – 192 Кбіт/с.

Бітрейт – кількість даних за одиницю часу, що використовуються для передачі аудіо потоку (наприклад, бітрейт 128 Кбіт/с розшифровується як 128 кілобіт в секунду і означає, що для кодування однієї секунди звуку використовується 128 тисяч біт).

Інший параметр, що суттєво покращує якість звуку – функція VBR, що дозволяє кодувати інформацію зі змінним бітрейтом в залежності від характеру сигналу (наприклад, якщо в музиці присутні різноманітні високочастотні звуки, що важче якісно стискаються, кодек приймає рішення використовувати для них найвищий бітрейт 320 Кбіт/с.

Кодек **WMA** розроблений фірмою Microsoft як стандарт зберігання стисненої аудіо інформації в операційній системі Windows. Microsoft не став користуватися розробками організації MPEG, тому стандарт WMA є закритим для використання іншими розробниками.

Оскільки Microsoft прагне максимально захистити музику від нелегального копіювання, тому WMA-файли не можна переконвертувати у файли з розширенням WAV.

ВИБІР КОДЕКА ДЛЯ ЗВУКУ

При виборі кодека слід пам'ятати: якщо необхідний мінімальний розмір файлу – використовують кодек від Microsoft; якщо необхідно максимальну якість звуку (нехтуючи розмірами файлу), вибрати доцільно Lame.

Часто документ Word «розвалюється» на комп'ютері з іншою версією операційної системи або MS Office, так що доводиться приводити його до первинного виду, відновлюючи втрачене форматування. Проте цього можна уникнути.

ФОРМАТ PDF

PDF (Portable Document Format) – створений спеціально для ліквідації проблем з відображенням інформації у файлах.

Переваги:

- документ, збережений у форматі PDF, однаково виглядає у будь-якій операційній системі;
- PDF використовує якісні алгоритми стиску: якщо об'єм файлу Word, що містить пару картинок, не менше мегабайта, то це й же файл PDF цілком поміститься в 300-400 Кбайт;
- PDF вміє вбудовувати у себе всі шрифти, що використовуються у документі;
- у формат PDF можна перетворити будь-який електронний документ (для прочитання та друку PDF знадобиться безплатна програма Acrobat Reader).

Створення PDF-файлу.

Спершу необхідно інсталювати пакет Acrobat Professional (у програмах з'явиться нова Панель інструментів, що містить, зазвичай, три кнопки).

Відкривають файл, що повинен перекодуватися в PDF-формат, натискаючи

кнопку Convert to Adobe PDF на вищевказаній Панелі інструментів. У вікні, що відкривається, вказується бажане ім'я файлу, що створюється у форматі PDF та Шлях (місце розташування), де від повинен зберігатися. Команда ОК завершує операцію автоматичним відкриттям для перегляду.

Після встановлення Acrobat Professional у системі з'являється новий віртуальний принтер під назвою Adobe PDF – можна побачити його ярлик, відкривши папку Принтери через Панель управління. Він називається віртуальним, тому що реальне не існує і використовується саме для створення PDF-файлів. Тому друкують на ньому теж віртуально, але результат при цьому буде цілком реальним. Відкривають програму, з документу що потрібно одержати в PDF, та вибирають опцію Файл→Друк. Далі відкривають список доступних принтерів, вибирають Adobe PDF і натискають ОК. Після цього задають ім'я нового файлу та його місце розташування, і через мить він буде готовий.

Додаткові налаштування при створенні PDF-файлу.

Клікають по значку принтера Adobe PDF правою кнопкою миші та вибирають Налаштування друку. Все найкорисніше розміщене на вкладці Adobe PDF Settings. Можна вибрати шаблон, по якому будуть створюватися файли:

- High Quality – для створення PDF з високою роздільною здатністю та підвищеною якістю;
- Smallest file size – для зменшення об'єму файлу;
- Edit – створення власного шаблону.

Тут же можна задати налаштування безпеки. Можна встановити відсутність захисту (None) або передбачити програмі перепитувати про опції безпеки при кожному створенні PDF (Reconfirm security for each job) – в цьому випадку необхідно натиснути розташовану поряд кнопку Edit та задати пароль, що блокуватиме доступ до нових файлів. Тут же приховуються такі корисні функції, як пароліна заборона деяких можливостей роботи з файлом: можна дозволити відкриття файлу, але заборонити його друк чи зберігання в іншому форматі чи під іншим іменем.

§ 9 Методи організації і ущільнення каналів зв'язку.

9.1. Загальні фізичні характеристики і схеми організації каналів зв'язку.

Канал зв'язку (КЗ) – це сукупність лінії зв'язку та приймально-передаючих пристроїв, яка забезпечує передачу інформації від джерела до споживача з потрібними показниками якості.

Якщо обмін інформацією здійснюється в одному напрямку, **КЗ** називається **симплексним**, якщо в обох напрямках одночасно – **дуплексним**. Канали зв'язку реалізуються через певне фізичне середовище, по якому сигнали здатні проходити без суттєвого згасання потужності.

В каналах зв'язку використовуються дротові, радіо- та радіорелейні і волоконно-оптичні лінії зв'язку. По дротових лініях зв'язку розповсюджуються сигнали електричного струму, по радіолініях – сигнали енергії електромагнітного поля.

Для передачі електричних сигналів використовують наступні фізичні середовища:

- лінію з двох провідників (двопроводову лінію);
- радіолінію (електромагнітне поле між передавальною і приймальною антенами);
- волоконно-оптичну лінію (гнучкий світлопровід розміщений у захисній оболонці);
- оптичну лінію (електромагнітне поле між випромінювачем і приймачем).

Двопроводна лінія реалізується у багатьох варіантах.

Варіант перший – два провідники в загальній ізоляції – телефонний провід для внутрішньої проводки, ізольовані провідники для з'єднання між собою елементів та інформаційних пристроїв, розміщених на відстані від кількох сантиметрів до кількох метрів.

Варіант другий – повітряна лінія зв'язку з двох неізольованих дротів, підвішених на опорах. Застосовується для телефонного зв'язку низового рівня, але збереглися ще повітряні міжміські лінії зв'язку.

Варіант третій – скручена пара ізольованих дротів – кабельна пара в багато парному телефонному кабелі. Кабель зв'язку утворюється з кількох або кількох десятків пар ізольованих провідників, розміщених в захисній герметичній оболонці з діелектричного матеріалу. Для захисту кабелю від корозії і механічних пошкоджень на оболонку накладають захисне покриття – броню з сталевий стрічки або дроту. Кожна пара провідників утворює електричний ланцюг, по якому передаються сигнали інформації – телефонні розмови, радіомовлення, фототелеграми. За призначенням телефонні кабелі поділяють на низькочастотні і високочастотні.

Низькочастотні кабелі застосовують для з'єднувальних ліній між міськими автоматичними телефонними станціями (АТС) та АТС і МТС (міжміськими телефонними станціями), а також для внутрішніх з'єднань у вузлах зв'язку.

Високочастотні кабелі застосовуються на міжміських кабельних магістралях для з'єднання між собою МТС, а також для з'єднання МТС з радіоцентрами і радіостанціями. В міському телефонному кабелі кабельних пар є від кількох десятків до сотні. Ємність магістрального (міжміського) симетричного кабелю від 30 до 120 кабельних пар.

Варіанти четвертий і п'ятий – однопарний коаксіальний кабель і багато парний коаксіальний кабель.

Радіолінії реалізуються у двох варіантах – радіолінія без ретрансляції і радіолінія з ретрансляцією – радіорелейна лінія.

Радіолінія без ретрансляції реалізується через радіопередавач – передаючу антену – електромагнітне поле – приймальну антену – радіоприймач. Носієм сигналу в радіолінії є коливання енергії електромагнітного поля, які переносяться хвилями. Дальність передачі радіосигналу залежить від довжини хвилі, стану земної поверхні і атмосфери, сонячної радіації, конструкції і параметрів антени.

Довжина хвилі – відстань, яку хвиля проходить за час, що дорівнює одному періоду коливань. Спів відношення між довжиною радіохвилі і частотою коливання переносника подається формулою:

$$\lambda = c / f, \quad (9.1)$$

де λ – довжина хвилі, м;

c – швидкість розповсюдження електромагнітного поля, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с;

f – циклічна частота коливання, c^{-1} .

У таблиці 9.1. наведені дані щодо діапазонів радіохвиль і відповідним їх частот радіосигналів за сучасним стандартом.

Таблиця 9.1. Класифікація радіочастот та радіохвиль.

№	Радіочастоти		Радіохвилі	
	Назва	Межі	Назва	Межі
1	вкрай низькі	3...30 Гц	декаметрові	100...10 Мм
2	наднизькі	30...300 Гц	мегомметрові	10...1 Мм
3	інфранизькі	0,3...3 КГц	гектокілометрові	1000...10 Км
4	дуже низькі	3...30 КГц	міріаметрові	100...10 Км
5	низькі	30...300 КГц	кілометрові	10...1 Км
6	середні	0,3...3 МГц	гектометрові	1...0,1 Км
7	високі	3...30 МГц	декаметрові	100...10 м
8	дуже високі	30...300 МГц	метрові	10...1 м
9	ультрависокі	0,3...3 ГГц	дециметрові	1,0...0,1 м
10	надвисокі	3...30 ГГц	сантиметрові	10...1 см
11	вкрай високі	30...300 ГГц	міліметрові	10...1 мм
12	гіпервисокі	0,3...3 ТГц	дециміліметрові	1,0...0,1 мм

Радіорелейна лінія – це радіолінія, вздовж якої через кожні 40...50 км встановлені підсилювальні приймально-передаючі станції.

Носієм сигналу в радіорелейній лінії є коливання енергії електромагнітного поля надвисокої частоти, з довжинами хвилі від 3 см до 60 см, які мають малу потужність і сильне згасання у приземних шарах атмосфери. Тому сигнал РРЛ необхідно через кожні 40...50 км підсилювати. Перші радіорелейні лінії створювались для передачі телевізійних програм з центру на окраїни держави. По сучасних РРЛ, крім телевізійних каналів передаються сотні телефонних розмов з частотним ущільненням лінії.

Волоконно-оптичні лінії зв'язку реалізуються через спеціальні напрямні системи – світловоди.

В волоконно-оптичних кабелях зв'язку замість мідних провідників використовуються скловолоконні світловоди, по яких передається інформація у вигляді світлових сигналів, модульованих сигналами телевізійними, телефонними, сигналами передачі комп'ютерних мереж.

Двопроводові лінії зв'язку – повітряні і кабельні, характеризуються первинними і вторинними параметрами передачі.

До первинних параметрів лінії зв'язку належать наступні:

- погонний активний опір провідників R (опір на одиницю довжини проводу), $Ом/км$;
- погонна індуктивність, $Гн/км$;
- погонна ємність, $Ф/км$;
- погонна провідність ізоляції, $Сіменс/км$;
- активний опір $R \approx R_0 + R_{ПЕ}$, де R_0 – опір постійного струму, $R_{ПЕ}$ – опір поверхневого ефекту.

Поверхневий ефект полягає у тому, що при змінному струмі густина струму у провіднику є нерівномірною, дорівнює нулю в центрі провідника і збільшується від центру до поверхні. Чим вища частота струму, тим тонший електропровідний шар і тим вищий опір провідника. Це явище обмежує смугу частот, яка може ефективно передаватися по двопроводовій лінії чи по кабельній парі. Ця смуга частот залежить від діаметру провідника, його матеріалу (мідь, алюміній) матеріалу ізоляції, типу скрутки жил.

До вторинних параметрів двопроводової лінії належать наступні:

- хвильовий опір $Z_{xв} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{R + j\omega C}} \approx \sqrt{\frac{L}{C}}$;
- вхідний опір $Z_{вх} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}}$;
- стала передачі $\gamma = \alpha + j\psi = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$,

де α – коефіцієнт згасання напруги або струму;

ψ – коефіцієнт зсуву фази.

Визначальним вторинним параметром проводової лінії (кабельної пари) є f_n – смуга частот, яка ефективно (з нормованим згасанням) може передаватися по лінії. Під f_n мається на увазі верхня частота сигналу, яка проходить по лінії з нормованим ослабленням. Сигнали нижчих частот будуть мати менше ослаблення.

Вторинні параметри визначають умови розповсюдження електромагнітної енергії вздовж лінії зв'язку. Смуга частот електричного сигналу, яку ефективно (з нормованим згасанням) здатна пропускати кабельна лінія, залежить від типу кабелю та його призначення. Міський телефонний кабель розрахований на пропускання сигналів у смузі частот $0...36 \text{ КГц}$, міжміський високочастотний телефонний кабель має смугу частот від $0...252 \text{ КГц}$. Смуга частот сигналів, які передають по

коаксіальному кабелю – $0...10 \text{ МГц}$.

По відношенню до сигналу, який передається по лінії, лінія може бути короткою або довгою.

Довгою називається лінія, довжина якої значно більша за довжину хвилі електромагнітного коливання, яке розповсюджується у лінії.

У довгій лінії переносником сигналу є енергія електромагнітного поля, яка розповсюджується вздовж лінії. Провідники лише виконують роль напрямної системи. Довга лінія є розподіленим об'єктом, тобто об'єктом, первинні параметри якого рівномірно розподілені по довжині лінії.

Коротка лінія є об'єктом зосередженим, тобто такою, параметри якого можна з деяким наближенням, яке не приводить до суттєвої похибки, вважати зосередженим в одній точці. З таким же наближенням можна вважати, що в короткій лінії сигнал переноситься електричним струмом.

Електричні сигнали інформації, які передаються по каналах зв'язку, відрізняються між собою формою і частотою коливань. Наприклад, телефонна розмова передається по кабелю складними сигналами електричного струму, частота коливань якого змінюється в діапазоні $0,3...3,4 \text{ КГц}$. Телевізійний сигнал має ширину смуги частот $0...8000 \text{ КГц}$. Стандартом МЕК (Міжнародна електротехнічна комісія) на 1 телефонний канал при ущільненні кабельних ліній виділяється смуга шириною $0...4000 \text{ КГц}$.

В радіоканалах використовуються діапазони частот від 150 КГц до 30 МГц це довгі, середні та короткі радіохвилі, від 60 МГц до 150 МГц – ультракороткі радіохвилі. В діапазонах довгих, середніх та коротких хвиль радіозв'язок і радіомовлення здійснюються з амплітудною модуляцією, в діапазоні ультракоротких хвиль – з частотною модуляцією.

Верхня частота лінії зв'язку обмежує кількість телефонних каналів, до якої можна ущільнити лінію. Якщо ж у телефонну лінію ввімкнений комп'ютер, то верхня частота обмежує швидкість приймання інформації та її передачі. Смуга частот радіоканалу залежить від того, яким є джерело інформації – радіотелефон, радіотелеграф, радіотелеметрія, який застосовано спосіб модуляції – АМ, ЧМ, АІМ, ЧІМ і т.д., який спосіб передачі – з однією бічною смугою чи з двома. Але радіоканал за своїм частотним діапазоном використовують тільки для передачі радіотелефонної, радіотелеграфної та радіотелеметричної інформації.

Радіорелейні канали працюють в діапазоні дециметрових і сантиметрових хвиль (частоти коливань – носіїв – 60 см і 3 см). Тому вони придатні для передачі і телевізійних сигналів і великої кількості телефонних сигналів. Радіорелейні канали зв'язку відрізняються від радіоканалів тим, що між передавачем і приймачем інформації через певну відстань необхідно встановлювати підсилювальні пункти.

Волоконно-оптичні канали зв'язку дозволяють передавати сигнали в діапазоні нанометрових хвиль (від $0,3$ до $0,7 \text{ нм}$), тобто в діапазоні видимого світлового випромінювання і здатні передавати найбільшу кількість інформації.

Типовими схемами організації каналів зв'язку є схеми, зображені на рис. 9.1

9.2. Інформаційні характеристики каналів зв'язку.

Розглядаючи будь-яку інформаційну систему, ми можемо в ній відокремити джерело інформації, канал передачі і приймач інформації. Переносником інформації є сигнал, який в загальному випадку є випадковим процесом зміни деякої фізичної величини. Сукупність сигналів характеризують деякі узагальнені характеристики, а саме:

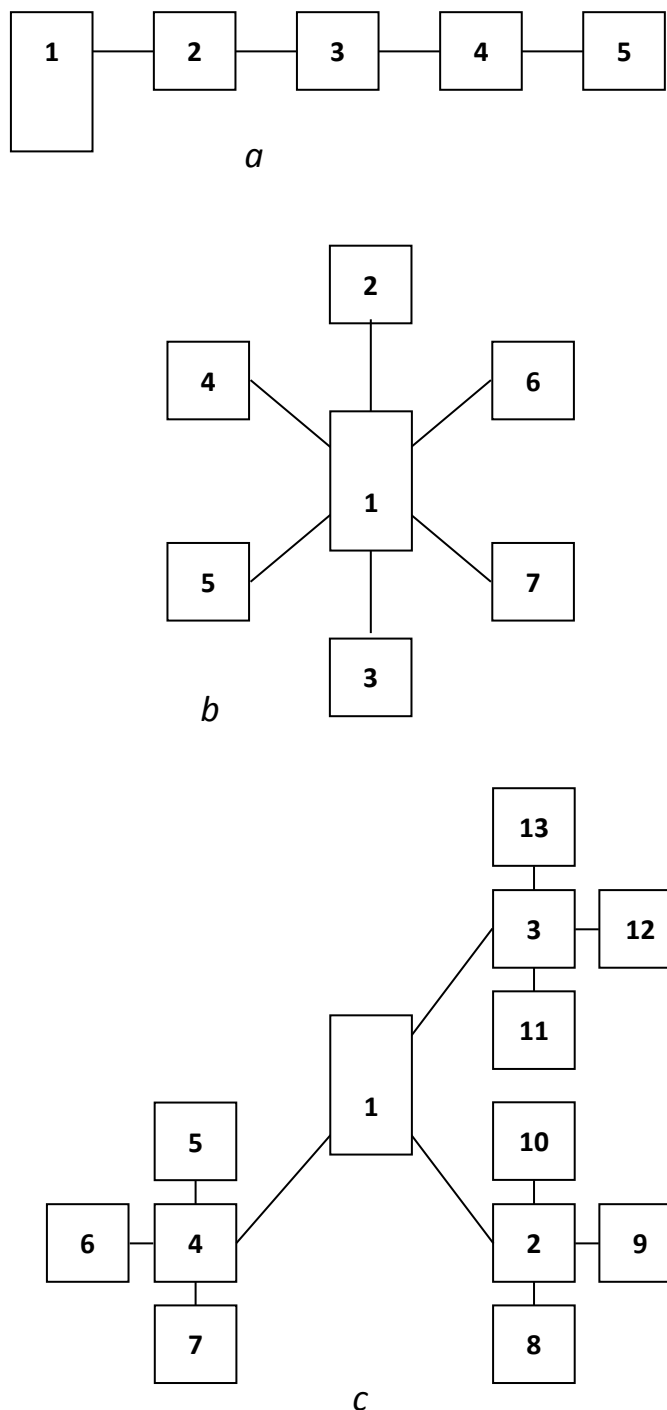


Рис. 8.1. Типові схеми організації каналів зв'язку:

a – ланцюгова; *b* – радіальна; *c* – деревовидна;

- тривалість сигналу або час передачі сигналу T_c ;
- частотний спектр сигналу або смуга частот коливань, у якій зосереджена енергія сигналу F_c ;
- середня потужність сигналу P_c , подана через його динамічний діапазон

$$D_c = \log_2 \frac{P_c}{P_{ui}} \quad (9.2)$$

Для оцінки інформаційного вмісту сигналу взято двійковий логарифм, а за нульовий рівень взято потужність «шуму» джерела
Величину

$$V_c = T_c F_c D_c \quad (9.3)$$

названо **об'ємом сигналу**.

Канал передачі інформації також можна охарактеризувати трьома відповідними параметрами, а саме:

- часом використання каналу T_k ;
- смугою частот ефективного перепускання каналу F_k ;
- динамічним діапазоном каналу D_k , який визначає здатність каналу передавати найвищий і найменший рівні сигналу.

Величину

$$V_k = T_k F_k D_k \quad (9.4)$$

названо **ємністю каналу**.

Передача сигналів без спотворень можлива тільки за умови, що сигнал за своїм об'ємом менший, або дорівнює ємності каналу

$$V_c \leq V_k \quad (9.5)$$

Ця умова є необхідною, але не є достатньою. Достатньою умовою є узгодження за всіма параметрами, а саме:

$$T_c \leq T_k; F_c \leq F_k; D_c \leq D_k \quad (9.6)$$

Для оцінки придатності каналів для передачі інформації без спотворень, введемо додаткові характеристики:

- швидкість вводу інформації;
- швидкість передачі інформації;
- перепускную здатність каналу.

Швидкість вводу інформації – середня кількість інформації, яка передається по каналу за одиницю часу.

Ця характеристика належить джерелу повідомлень і визначається тільки статистичними властивостями повідомлень.

Швидкість передачі інформації – середня кількість інформації, яка передається по каналу за одиницю часу.

Вона залежить від статистичних властивостей сигналу і характеристик каналу.

Перепускна здатність каналу – найбільша для даного каналу швидкість передачі інформації, якої теоретично можна досягнути.

При ефективному використанні каналу швидкість передачі інформації наближається до перепускної здатності, а швидкість вводу інформації не повинна перевищувати перепускної здатності каналу. Вищенаведене є основною умовою узгодження джерела повідомлень і перепускної здатності інформаційного каналу. К. Шеннон дослідив залежність швидкості передачі і перепускної здатності від параметрів каналу та характеристики сигналу і завади та довів дві фундаментальні теореми.

9.3. Теореми К. Шеннона про пропускну здатність каналу зв'язку.

Розглянемо теореми Шеннона про пропускну здатність каналу зв'язку. Існує джерело інформації X і приймач Y , з'єднані каналом зв'язку. Відома продуктивність джерела інформації $H_1(X)$, як середня кількість двійкових одиниць інформації (біт), що видає джерело за одну одиницю часу. Відома також пропускна здатність каналу, тобто максимальна кількість біт за одну одиницю часу, яку здатен пропустити через себе канал. Якою повинна бути пропускна здатність каналу, щоб інформація через нього проходила без затримки. Відповідь на питання дає

1-а теорема Шеннона:

Якщо пропускна здатність каналу зв'язку C_1 , більша ентропії джерела інформації за одиницю часу $C_1 > H_1(X)$, то завжди можна закодувати досить довге повідомлення так, щоб воно було передане каналом зв'язку без затримки. Якщо ж, навпаки $C_1 < H_1(X)$, то передача інформації без затримки неможлива.

Ця теорема справедлива для каналу зв'язку, в якому відсутні завади, а передача інформації здійснюється без помилок. Канал зв'язку, в якому можливі спотворення називається **каналом з завадами**. У багатьох випадках помилки виникають ще у пристроях кодування або декодування. Очевидно, що наявність завад і поява помилок призводить до втрати інформації. Щоб в умовах присутності завад отримати на приймачі повний об'єм інформації, треба впроваджувати спеціальні заходи. Одним з таких заходів є введення надмірності в повідомлення, що передаються, при цьому джерело інформації видає більше символів, ніж це було б потрібно при відсутності завад. Одну з форм введення надмірності в коди ми же розглядали у надмірних кодах.

За допомогою методів теорії інформації можна для будь-якого рівня завад знайти потрібний ступінь надмірності джерела інформації (або коду).

Нехай джерело інформації є фізичною системою X , яка має n -можливих станів $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ з ймовірностями $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$.

Розглядаємо ці стани як елементарні символи, які може передавати джерело через канал зв'язку до приймача. Кількість інформації на один символ дорівнює

ентропії на один символ $H(X) = -\sum_{i=1}^n p_i \log p_i$

Якби не було помилок при передачі, то кількість інформації у приймачеві (у системі Y) відносно X була б такою самою. При наявності помилок воно буде меншим:

$$I_{Y \leftrightarrow X} = H(X) - H(X/Y). \quad (9.7)$$

Умовну ентропію $H(X/Y)$ розглядаємо як втрату інформації на один елементарний символ, пов'язану із наявністю завад. Якщо вміти визначити втрати інформації в каналі із завадами на один елементарний символ переданого повідомлення, можна визначити пропускну здатність каналу зв'язку із завадами, тобто максимальну кількість інформації, яку здатен передати канал за одну одиницю часу.

Нехай канал може передати за одну одиницю k елементарних символів. При відсутності завад пропускну здатність каналу дорівнює $C = k \log n$. Пропускну здатність каналу з завадами

$$C = k \max I_{(Y \leftrightarrow X)}^{(1)}. \quad (9.8)$$

де $I_{(Y \leftrightarrow X)}^{(1)}$ максимальна інформація на один символ, яку може передати канал із завадами.

Визначення цієї максимальної інформації в загальному випадку – справа досить складна, тому що треба знайти ймовірність спотворень символів, характер спотворень. Але для деяких простіших випадків пропускну здатність каналу все ж можна обчислити. Знаючи пропускну здатність каналу, можна визначити верхню межу швидкості передачі інформації по каналу з завадами.

2-га теорема Шеннона:

Якщо існують джерело інформації з ентропією $\tilde{H}(X)$ за одиницю часу і канал з пропускну здатністю C , та $\tilde{H}(X) > C$, то при будь-якому кодуванні передача повідомлень без затримки і спотворень неможлива. Якщо ж $\tilde{H}(X) < C$, то завжди можна будь-яке повідомлення закодувати так, щоб воно було передане без спотворень з ймовірністю як завгодно наближеною до 1.

9.4. Частотний і часовий принципи ущільнення каналів зв'язку.

Наш телефонний апарат або модем комп'ютера під'єднаний до комутаційного обладнання АТС (автоматичної телефонної станції) за допомогою двох провідників, які скручені разом і утворюють пару в багато парному кабелі. Ця пара називається абонентською лінією. Інші пари в цьому кабелі віддані під абонентські лінії нашим сусідам. Після набору номера комутаційне обладнання нашої АТС з'єднує нашу лінію з іншою парою провідників, яка з'єднує нашу АТС з другою АТС, до якої під'єднана абонентська лінія того, з ким ми хочемо говорити. Лінії між двома АТС називаються з'єднувальними. Число з'єднувальних ліній між двома АТС значно менше числа абонентських ліній, тому що не всі абоненти якоїсь АТС хочуть

одночасно з'єднатися з абонентами іншої АТС. Число з'єднувальних ліній між АТС залежить від взаємного тяжіння між цими АТС. При невеликій відстані між АТС прокладають низькочастотний кабель на 30-60 пар. По кожній парі одночасно працює один телефонний канал, тобто з'єднуються два телефонних абоненти у протилежних кінцях. Якщо навантаження (трафік) такий, що одного кабелю не вистачає, то треба збільшувати число з'єднувальних ліній, тобто прокласти ще один або більше кабелів. Тут існує два шляхи – якщо відстань між АТС невелика, то економічно вигідним є прокласти додатковий кабель. Якщо довжина кабелю велика, то прокласти кабель економічно не вигідно. У цьому випадку застосовують так зване «ущільнення» ліній зв'язку, яке дозволяє по одній кабельній парі реалізовувати 24, 30, 48, 96 і т.д. телефонних каналів. Якщо ж кабель високочастотний коаксіальний або волоконно-оптичний, то число каналів може досягати кількох тисяч.

Якщо АТС знаходиться у різних містах, то зв'язок між ними здійснюється через МТС (міжміську телефонну станцію), яка з'єднана з АТС з'єднувальними лініями. МТС різних міст з'єднані між собою міжміським телефонним кабелем та радіорелейними лініями. По кожній парі міжміського телефонного кабелю або по кожному радіорелейному каналу за допомогою апаратури ущільнення організовується від кількох десятків до кількох сотень або тисяч телефонних каналів. Для створення багатоканальних систем застосовуються два принципи ущільнення ліній зв'язку – частотний та часовий.

Частотний принцип ущільнення каналів, показаний на схемі рис.9.2 полягає у тому, що в смузі частот, яка передається по лінії зв'язку, кожному телефонному каналу виділяється своя частота гармонічного синусоїдального коливання-носія. На це коливання методом амплітудної модуляції накладається сигнал телефонного каналу. Після модуляції отримують сигнал з частотами $f_n - \Delta\Omega$, f_n , $f_n + \Delta\Omega$. За допомогою фільтра виділяють одну з смуг бічних частот $f_n - \Delta\Omega$ або $f_n + \Delta\Omega$, яка й передається по лінії разом з іншими такими самими, але різними за частотою на 4 кГц . У стандартній системі з частотним розподілом каналів ширина каналу дорівнює 4 кГц . Сигнал мікрофону 1 підсилюється підсилювачем каналу ПК і модулює сигнал частоти-носія f_1 . Після модулятора отримуємо сигнали двох бокових смуг $f_1 - \Delta\Omega_1$ і $f_1 + \Delta\Omega_1$. За допомогою фільтра бічної смуги сигнал $f_1 + \Delta\Omega_1$ пропускаємо, а $f_1 - \Delta\Omega_1$ – затримуємо. Далі сигнал $f_1 + \Delta\Omega_1$ підсилюється підсилювачем бічної смуги свого каналу і надходить до групового підсилювача ПГ. Підсилений сигнал проходить по каналу зв'язку разом з іншими, згасає в каналі зв'язку і з ослабленою амплітудою сприймається на приймальному пункті. За допомогою групового підсилювача ПГ він підсилюється і надходить на фільтри ФБ, кожний з яких налаштований на свою смугу частот.

Нехай перший канал має частоту носія 4000 Гц , $\Delta\Omega_1 = 300 \dots 3400 \text{ Гц}$. Тоді смуга частот першого каналу $f_1 \pm \Omega_1 = 4,0 - (0,3 \dots 3,4)$, $4,0$, $4,0 + (0,3 \dots 3,4) \text{ кГц}$. Смуга від $f_1 - \Omega_1 = 600 \dots 3700 \text{ Гц}$ до 4300 Гц – фільтром затримується, а

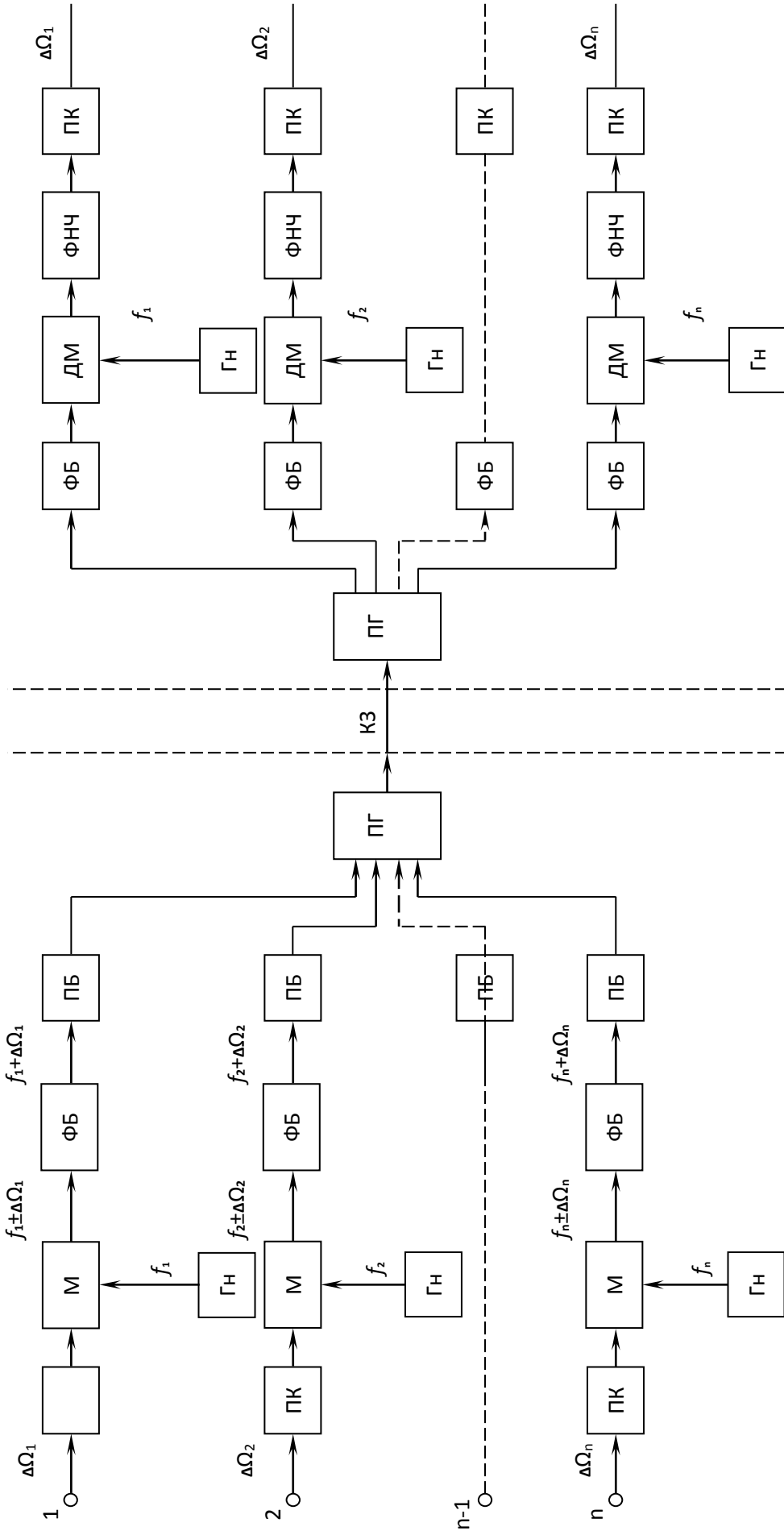


Рис. 9.2. Схема функціональна частотного методу ущільнення ліній зв'язку:

1, 2, ..., n – джерело інформації; ПК – підсилювач каналу; М – модулятор; ФБ – фільтр бічної смуги частот; ГН – генератор частоти носія; ПБ – підсилювач бічної смуги частот; ПГ – груповий підсилювач; КЗ – канал зв'язку; ДМ – демодулятор; ФНЧ – фільтр нижніх частот

$f_1 + \Omega_1 = 4300 \dots 7700 \text{ Гц}$ – фільтром пере пускається. Смуга $0 \dots 4000 \text{ Гц}$, яка може передаватися безпосередньо без модуляції використовується як службовий канал. Частота носія другого каналу – 8000 Гц . Після модулятора маємо $8000 \pm (300 \dots 3400) \text{ Гц}$. Смуга $[8000 - (300 \dots 3400)] \text{ Гц}$ – затримується, а $[8000 + (300 \dots 3400)] \text{ Гц}$ – пере пускається через ФБ і т.д. На приймальному пункті сигнал проходить через підсилювачі, фільтри і демодулятор. На демодулятор, крім сигналу подається частота-носій каналу f_1, f_2 і т.д. Після демодулятора отримуємо $f_1 + (f_1 + \Omega_1)$ і $f_1 - (f_1 + \Omega_1)$. Першу ФБ перепускає, а другу затримує. Після фільтрів маємо $|\Delta\Omega_1|$, яку підсилюємо і яка є переданим сигналом.

Недоліки частотного методу ущільнення лінії зв'язку при великому числі каналів полягають у взаємному впливі сигналів одного каналу на сигнал іншого через не ідеальності фільтрів і не лінійності ланок. Комбінаційні гармоніки одного каналу попадають у смугу перепускання іншого каналу і спотворюють інформацію.

Міжміський магістральний симетричний кабель МКС має смугу перепускання до 252 кГц . За допомогою системи ущільнення типу К-60 по одній кабельній парі можна реалізувати 60 телефонних каналів. Якщо ємність кабелю $4 \times 4 = 16$ провідників або 8 пар, то по кабелю здійснюється 480 телефонних каналів. По одній парі коаксіального кабелю смугою перепускання $8,6 \text{ МГц}$ реалізується ущільнення до 1920 телефонних каналів або передача 1-го телевізійного каналу.

Часовий принцип ущільнення або часовий розподіл каналів (ЧРК) полягає у тому, що сигнали кожного телефонного, телеграфного чи комп'ютерного абонента передаються по лінії (кабельній парі) по черзі, послідовно у часі. Принципова схема ЧРК зображена на рис. 9.3. Сигнали всіх абонентів подаються на входи комутатора (мультиплексора), який послідовно в часі оббігає всі входи і на короткий час з'єднує абонента з лінією зв'язку. Цим самим аналоговий сигнал кожного абонента дискретизується, перетворюється на послідовність дискретних сигналів. Частота дискретизації вибирається за теоремою Котельнікова. У телефонному каналі найвищою частотою є частота 4 кГц , отже період дискретизації дорівнює $1/8000 \text{ с}$ або 125 мкс . В результаті дискретизації отримують послідовність коротких ампліудно-модульованих імпульсів (АІМ). Далі амплітуда кожного імпульсу вимірюється цілим числом квантів (квантується за рівнем), а число квантів кодується війковим кодом. Всі ці операції реалізуються аналого-цифровим перетворювачем АЦП. В результаті квантування за рівнем і кодування здійснюється імпульсно-кодова модуляція – ІКМ. Кодоімпульсний сигнал передається по лінії зв'язку. На приймальному пункті комутатор К2, який працює синхронно з комутатором К1 передаючого пункту, по черзі під'єднує лінію до приймача каналу, в якому відбувається зворотне перетворення сигналу, а саме – кодоімпульсний сигнал цифро-аналоговим перетворювачем (ЦАП) перетворюється у аналоговий сигнал первинної інформації, тобто у телефонний сигнал. Якщо ж по телефонному каналу

з'єднані комп'ютери, аналоговий сигнал проходить через фільтр нижніх частот на модем комп'ютера, де знову перетворюється на дискретний і далі через інтерфейс модему проходить у комп'ютер.

9.5. Вмикання комп'ютера в канал зв'язку. Структурна схема модему.

Розглянемо структурну схему універсального аналогового модему (рис. 9.4). Модем складається з п'яти блоків – блоку спряження модему з лінією зв'язку – 1, двох числових обчислювальних пристроїв – **DSP** і мікроконтролера **V.42/V.42 bis/MNP**, блоку 2 спряження цифрових пристроїв з лінійним блоком і блоків спряження модему з комп'ютером. В блоці 2 диференціальна система (ДС) розділяє сигнали, які приймаються від сигналів, які передаються. Прийнятий аналоговий сигнал через фільтр ФНЧпм приходить до АЦП, де перетворюється в кодоімпульсний сигнал. Далі цей сигнал через інтерфейс модему подається до цифрового процесора DSP, з якого через мікроконтролер керування попадає на інтерфейс комп'ютера. Сигнали двійкового коду, які передаються з «свого» комп'ютера в лінію, через інтерфейс комп'ютера **RS-232** і мікроконтролер керування надходять до цифрового процесора **DSP**. Після обробки процесором вони через інтерфейс модему приходять до ЦАП, в якому перетворюються у відповідний аналоговий сигнал. Цей сигнал через фільтр ФНЧпр, дифсистему ДС і блок спряження виходить

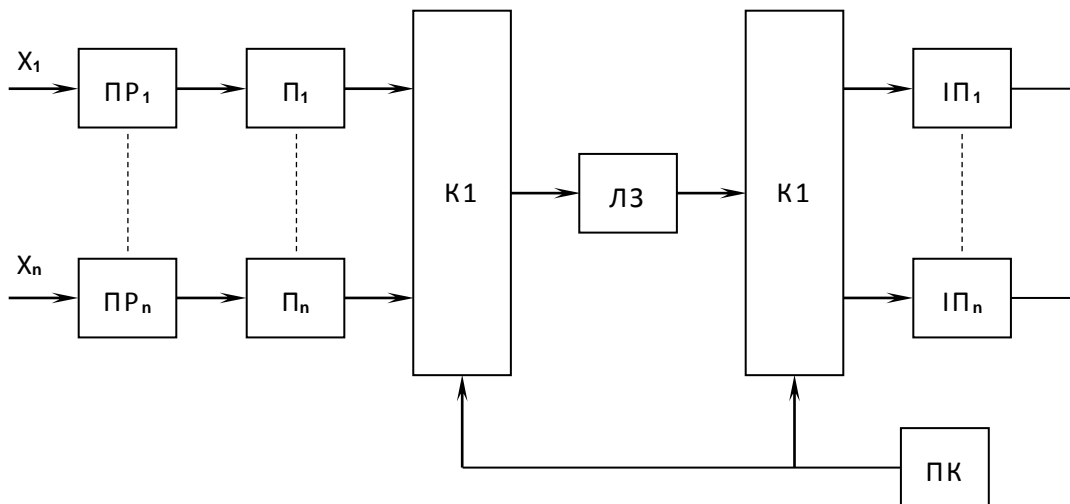


Рис. 8.3. Схема функціональна часового методу ущільнення лінії зв'язку.

у лінію зв'язку. Яка ж потрібна швидкість передачі цифровим ІКМ-сигналом аналогових сигналів телефонного каналу? Згідно з теоремою Котельнікова аналоговий сигнал потрібно замінити послідовністю імпульсів з частотою $2f_{\max} = 8000 \text{ імп} / \text{с}$ і амплітуду кожного імпульсу передати 8-й розрядним двійковим кодом. Отже, за секунду треба передати $N = 8000 \times 8 = 64 \cdot 10^3 \text{ біт} / \text{с}$ або $8 \text{ кбіт} / \text{с}$ інформації. На приймальному кінці кожна кодова комбінація з 8 бітів подається на вхід ЦАП, задача якого перетворити кодову комбінацію в напругу відповідного рівня. Далі сигнал з ЦАП проходить через НЧ фільтр з частотою зрізу $f_{\max} = 4 \text{ кГц} / \text{с}$, який реалізує перетворення Фур'є з пропорційними амплітудами, які у телефонному каналі за допомогою телефону перетворюються в умовні сигнали, ті самі, що були дискретизовані на передаючому пункті.

Навіщо в аналоговому модемі цифровий процесор **DSP**? Для того, щоб сформувати складний аналоговий сигнал для передачі і забезпечити оптимальне завадостійке приймання таких же сигналів, спотворених у каналі зв'язку. Це можливо тільки із застосуванням цифрових методів і алгоритмів. **DSP** під керуванням своєї програми готує цифрові коди відліку сигналу, які потім надходять у ЦАП модему. Амплітудно-модульовані відліки з виходу ЦАП після згладжуючого фільтра передачі (ФНЧ_{пр}) перетворюються у аналогові сигнали, які йдуть у лінію зв'язку.

В сучасних умовах існують системи з частотним ущільненням і системи з часовим розподілом каналів, а також АТС електронні (цифрові) і АТС з механічною комутацією каналів – координатні і декадно-крокові. АТС останнього типу є найбільш відсталими з точки зору впровадження систем цифрового і комп'ютерного зв'язку. Сучасна технологія електронної комунікації реалізує принцип часового розподілу каналів. Аналогово-цифрове та цифро-аналогове перетворення виконуються в цих системах на рівні абонентських ліній, а не апаратурі цифрового ущільнення між станційних ліній зв'язку. Отже в цьому випадку можна забезпечити швидкість передачі та приймання інформації на рівні $64 \text{ кбіт} / \text{с}$. Якщо ж зв'язок між комп'ютерами здійснюється через міські телефонні станції аналогового типу, гранична швидкість передачі інформації не більше $33,6 \text{ кбіт} / \text{с}$.

9.6. Поняття про сучасні комп'ютерно-інтегровані мережеві інформаційні системи.

Історично склалося так, що першим інформаційним пристроєм, який об'єднав країни світу і створив світову мережу, був телеграф Морзе. Винайдення телеграфу Морзе співпало у часі з розвитком залізничного транспорту. Розвиток мережі залізниць найбільше стимулював розвиток і поширення телеграфної мережі.

З 70-х років XIX ст. почався розвиток телефонного зв'язку. На той час вже існували за сучасною термінологією регіональні та глобальні телеграфні мережі. Існування на той час телеграфної мережі сприяло інтенсивному розвитку телефонного зв'язку. Телефон виявився більш комунікабельним і зручним засобом зв'язку, а головне – доступним для ненавченої приватної особи. Тому в містах інтенсивно почали розвиватися телефонні мережі – повітряні дротові, а потім і кабельні.

У 1895 р. було винайдене радіо, а з 1922 р., після винайдення триелектродної радіолампи почалося інтенсивне впровадження радіомовлення. До початку II-ої світової війни була створена потужна мережа радіостанцій і почалося впровадження телебачення. До 1965 р. вже були створені мережі телебачення і радіорелейних ліній.

Паралельно з цим створювалась мережа національних і університетських бібліотек, державних і корпоративних центрів науково-технічної інформації, патентних бюро, архівів, музеїв, де зосереджувались величезні обсяги інформації, забезпечувався доступ до неї та обмін. Таким чином ще до появи персонального комп'ютера була створена потужна індустрія і технології надання послуг у галузі доступу до інформації.

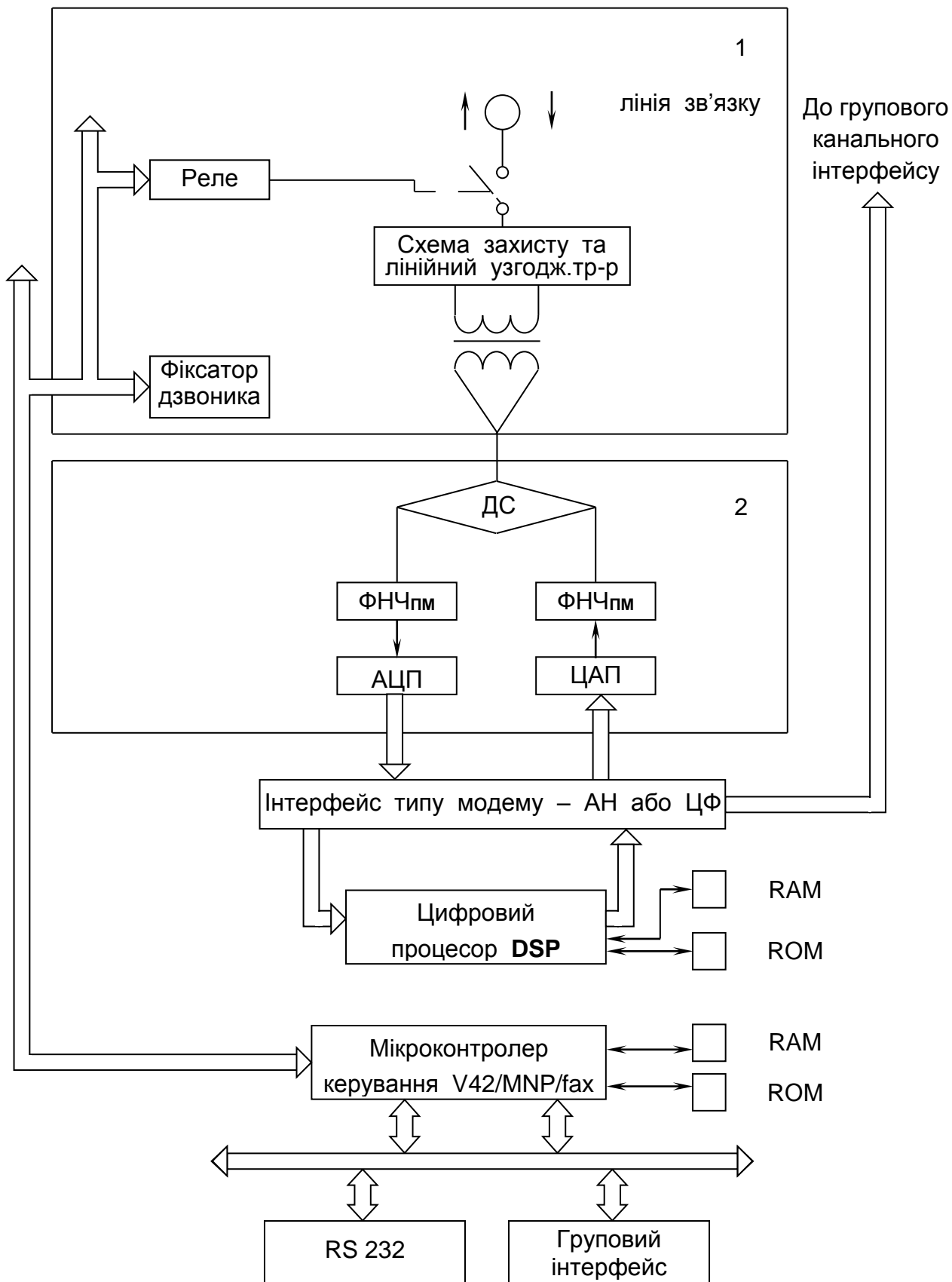


Рис. 9.4. Структура універсального модему

Але до появи комп'ютерних мереж всі ці послуги надавались окремо кожною галуззю, по окремих фізичних середовищах і різних кінцевих пристроях та не в реальному часі. Комп'ютерна обробка інформації і комп'ютерні мережі об'єднали різні компоненти інформації – телефон, радіо, телебачення, телеграф, бази даних, графіку в одну – цифрову інформацію, яку можна передавати по одному фізичному середовищу на один кінцевий пристрій – комп'ютер. Сучасні комп'ютерні мережі є яскравим прикладом застосування комп'ютерно-інтегрованих технологій у галузі обміну інформацією.

Розвиток комп'ютерних мереж пройшов чотири етапи. На першому з них використовувались аналогові телефонні мережі з аналоговими АТС та магістральні телефонні лінії з частотним ущільненням. Системи багатоканального телефонного зв'язку з частотним ущільненням ліній почали розвиватися в 30-х роках ХХ століття, а вже наприкінці 60-х років провідні спеціалісти світових телефонних компаній дійшли до висновку, що подальший розвиток аналогової телефонії є безперспективним.

На другому етапі для підвищення пропускної здатності мереж на магістральних лініях почали впроваджувати цифрові сполучення на основі принципу часового ущільнення – Time Division Multiplexing (TDM).

На третьому етапі почалося впровадження цифрових АТС і мереж на ґрунті концепції ISDN, розроблялась мережа вузькосмугової цифрової мережі з швидкістю передачі даних $192 \text{ кбіт} / \text{с}$ для передачі голосових, цифрових і відеоданих по одних і тих же цифрових лініях зв'язку за допомогою єдиного універсального обладнання користувача. Ця концепція має скорочену назву ISDN – Integrated Services Digital Network, що в перекладі означає цифрові мережі інтегрованих послуг. ISDN – це телефонна мережа з цифровими станціями, що сполучені цифровими каналами, яка створювалась з врахуванням її входження в комп'ютерні мережі. У цій мережі цифро-аналогове та аналого-цифрове перетворення здійснюється безпосередньо в терміналі користувача. Тому входження комп'ютерів в цю мережу не створює тих проблем, які треба вирішувати в аналогових телефонних мережах. Але пропускної здатності в $192 \text{ кбіт} / \text{с}$ виявилось замало для передачі відеоінформації і це привело до створення концепції широкосмугових мереж з інтеграцією послуг B-ISDN – Broadband Integrated Services Digital Network, технологія якої заснована на асинхронному способі переносу – Asynchronous Transfer Mode – ATM.

Впровадження технології B-ISDN потребує заміни не тільки апаратури АТС з аналогової на цифрову, але й заміни мідних кабельних пар на широкосмуговий коаксіальний кабель або волоконно-оптичний кабель. Впровадження цих мережевих технологій потребує великих витрат.

Разом з тим була розроблена технологія DSL – Digital Subscribers Line, у якій за рахунок застосування нових методів імпульсно-кодової модуляції і стиснення даних вдалося значно підвищити завадозахищеність та швидкість передавання даних. На відміну від ISDN, технологія DSL використовує існуючі телефонні мережі, тому її впровадження є значно дешевшим.

Щоб зрозуміти, що означають ці словосполучення почнемо з поняття **мультисервісної** мережі. Це комп'ютерні мережі, які надають клієнтам багато

послуг у галузі доступу до інформації та обміну інформацією.

Трафік – навантаження мережі, ті види інформації, якою обмінюються користувачі.

Мережене навантаження складається з двох видів трафіку – комп'ютерного і мультимедійного. **Комп'ютерний трафік** або трафік даних має свої особливості і свої складові. До нього належать такі види даних – передача файлів мережених операційних систем, передача файлів за протоколами FTP, електронна пошта, клієнт-серверні додатки, термінальний трафік. Передача даних може починатися раптово, тривати випадкові інтервали часу і раптово перериватися. Головною вимогою комп'ютерного трафіку до мережі є висока перепускна здатність при максимальному навантаженні.

Особливістю комп'ютерного трафіку є його чутливість до втрат і спотворення даних. Тому при передачі комп'ютерного трафіка на різних рівнях мережі виконується відновлення спотворених або втрачених даних шляхом повторної передачі фрагментів. Це знижує перепускну здатність мережі особливо при її перевантаженні і зниженні надійності каналів зв'язку. Гарантія доставки комп'ютерного трафіка без спотворення і у повному обсязі – принципова вимога до комп'ютерної мережі. **Мультимедійний трафік** – це той, у якому об'єднується інформація, що складається з компонентів аудіо, відео, графіки і т.д., це **трафік режиму реального часу**. Він має свої особливості. Для передачі голосу або відео зображення потрібна достатня перепускна здатність каналу передачі. Так, згідно з рекомендаціями ІТУ-Т для передачі голосу по цифрових каналах необхідно забезпечити перепускну здатність каналу $64 \text{ кбіт} / \text{с}$. Для передачі відео потрібно від кількох $\text{кбіт} / \text{с}$ до десяти $\text{мбіт} / \text{с}$ в залежності від типу зображення і вимог до його якості. Наприклад, система відеоспостереження може працювати по каналу з перепускною здатністю $2,4 \text{ кбіт} / \text{с}$, а для систем відео конференцій з високою якістю зображення і звуку потрібна перепускна здатність від $384 \text{ кбіт} / \text{с}$ до $8 \text{ мбіт} / \text{с}$.

Мультимедійний трафік дуже вимогливий до затримок сигналів. За рекомендацією ІТУ-Т затримка сигналу при передачі голосу не повинна перевищувати 150 мс . Інакше можуть спостерігатись спотворення розмови, втрати слів, ефект луни.

Але на відміну від трафіка даних, втрата або спотворення невеликої частини мультимедійних даних при передачі суттєво не впливає на якість кінцевої відтвореної інформації. У зв'язку з неперервною природою голосу і відео, приймач мультимедійного трафіку здатний сам відновити втрачені кванти інформації, якщо ці втрати досить малі і нетривалі. Тут не потрібна повторна передача спотворених або втрачених фрагментів. Основною вимогою клієнтів комп'ютерних мереж є забезпечення найвищої швидкості передачі і приймання інформації при мінімальних спотвореннях, а основною вимогою мережесистемних компаній є забезпечення найвищої ефективності використання мережі при достатній якості передачі. Задовольнити ці вимоги на сучасному рівні можуть мережі технології АТМ (Asynchronous Transfer Mode) – режим асинхронного передавання даних – це новітні мережі з інтеграцією послуг, у яких комутація здійснюється не на рівні каналів, а на рівні пакетів даних. Ця технологія на протязі 5-10 років замінить існуючі локальні та глобальну мережі.

Контрольні запитання.

1. Дайте загальну характеристику фізичних середовищ, по яких реалізуються канали обміну інформацією.
2. Назвіть первинні параметри кабельних ліній зв'язку.
3. Назвіть вторинні параметри кабельних ліній.
4. Який параметр є визначальним для швидкості відбору інформації з мережі?
5. Що таке смуга частот, які можуть ефективно передаватися по фізичному середовищу (лінії) і від чого вона залежить?
6. Назвіть смугу частот для різних ліній зв'язку – міського міжміського кабелю, радіоліній, радіорелейних ліній, коаксіального кабелю, волоконно-оптичної лінії.
7. Назвіть інформаційні характеристики сигналу і каналу зв'язку.
8. Запишіть і поясніть достатні умови, при яких можлива передача сигналів по каналу зв'язку без затримки і без втрати інформації.
9. Сформулюйте і поясніть теорему К. Шеннона про перепускную здатність каналу зв'язку.
10. Поясніть принцип частотного ущільнення лінії зв'язку і його недоліки.
11. Поясніть принцип часового ущільнення лінії зв'язку. В чому його переваги?
12. Структурна схема і принцип дії модему для зв'язку комп'ютерів через телефонний канал з аналоговою АТС.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Жураковський Д.П., Полторак В.П. Теорія інформації та кодування.: Підручник. – К.: Вища шк., 2001. – 255 с.: іл.
2. Иванов В.Г. та ін. Основи інформатики та обчислювальної техніки: Навч. посіб./ В.Г. Иванов, В.В. Карасюк, М.В. Гвозденко; За заг.ред. В.Г. Иванова. – К.: Юрінком Інтер, 2004. – 328 с.: іл.
3. Дмитриев В.И. Прикладная теория информации. – М.: Высшая школа., 1989 – 320 с.
4. Решетник В.Я. Введення в теорію інформації: Навч. посібник. – Тернопіль.: ТДТУ., 2002, – 130 с.
5. Бабенко Т.В., Сушко С.О., «Про ентропію української мови». – Захист інформації. – 2012. – № 3, С. 104 – 107.
6. Тадеев В. Системи числення (нумерації): Навч. посіб. Вид. 2-е. – Тернопіль.: Підручники і посібники, 202. – 32 с.
7. Березюк Н.Т., Андрущенко А.Г., Мощицкий С.С. и др. Кодирование информации (двоичные коды). – Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1978. – 252 с.
8. Корнійчук В.І., Тарасенко В.П., Тарасенко-Клятченко О.В. Основи комп'ютерної арифметики. – К.: «Корнійчук», 2006. – 164 с.
9. Кудряшов Б.Д. Теория информации: Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2009. – 320 с.
10. Панин В.В. Основы теории информации: учебное пособие для вузов / В.В. Панин. – 2-е изд., испр. И доп. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 436 с.: ил.
11. Лебедев О.М., Ладик О.І. Цифрова схемотехніка: Навчальний посібник / За ред. М.Ю. Ільченка. – К.: Арістей, 2005 – 247 с.
12. Мартынов Ю.М. Обработка информации в системах передачи данных. – М.: Связь, 1989. – 263 с.
13. Цимбал В.П. Задачник по теории информации и кодирования. – К.: Вища школа, 1976. – 276 с.
14. Алиев Т.М., Тер-Хачатуров А.А. Измерительная техника: Учебное пособие для технических ВУЗов. – М.: Высш.шк., 1991. – 384 с.

ДЛЯ НОТАТОК

A series of horizontal lines for taking notes.

Навчально-методична література

Курко А.М., Решетник В.Я.

ВВЕДЕННЯ В ТЕОРІЮ ІНФОРМАЦІЇ

**Посібник до вивчення дисципліни
«Теорія інформації»
для студентів за напрямом підготовки
6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології»**

Комп'ютерне макетування та верстка *А.П. Катрич*

Формат 60x90/16. Обл. вид. арк. 5,14. Тираж 10 прим. Зам. № 2883.

**Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя.
46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.**

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4226 від 08.12.11.