

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Український державний університет  
науки і технологій**

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих  
технологій

*В авторській редакції*

*Г. І. Манко*

**ОСНОВИ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОГО  
УПРАВЛІННЯ**

**Навчально-методичні рекомендації до практичних занять**

ДНІПРО  
2025

УДК 004.9:681.51(075)

О75

*Г. І. Манко*

Електронний аналог  
друкованого видання

Схвалено Групою забезпечення якості освітньої програми  
174.1.04 «Інтелектуальна автоматизація та робототехніка»  
(шифр)

Протокол № 1 від 12.12.2024

О75            Основи комп'ютерно-інтегрованого управління : навчально-методичні рекомендації до практичних занять / Г. І. Манко ; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Дніпро: УДУНТ, 2025. – 65 с.

Навчально-методичні рекомендації призначені для використання студентами спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» (освітньої програми «Інтелектуальна автоматизація та робототехніка») під час практичних занять.

Навчально-методичні рекомендації містять основні теоретичні основи комп'ютерно-інтегрованого управління, характеристики і методи обробки сигналів у комп'ютерно-інтегрованих системах, аналіз і методи розрахунку характеристик таких систем.

Табл.: 17. Бібліогр.: 9 назв.

© *Манко Г. І., 2025*

© *Укр. держ. ун-т науки і технологій, 2025*

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів	3
Вступ	4
1 Сигнали та їх характеристики	4
1.1 Частотне зображення періодичних сигналів	4
1.2 Частотне зображення неперіодичних сигналів	5
1.3 Практична ширина спектра сигналу	5
1.4 Приклади і задачі для самостійного розв'язання	6
1.5 Запитання для самоконтролю	10
2 Інформаційні характеристики сигналів	10
2.1 Ентропія дискретних повідомлень	10
2.2 Ентропія неперервних повідомлень	11
2.3 Розрахунок кількості інформації	13
2.4 Інформаційні характеристики випадкових похибок	14
2.5 Приклади і задачі для самостійного розв'язання	15
2.6 Запитання для самоконтролю	19
3 Пропускна спроможність каналу передачі	19
3.1 Теоретичні відомості і розрахункові співвідношення	19
3.1.1 Дискретний канал без завад	19
3.1.2 Дискретний канал із завадами	20
3.1.3 Неперервний канал без завад	21
3.1.4 Неперервний канал із завадами	22
3.2 Приклади і задачі для самостійного розв'язання	22
3.3 Запитання для самоконтролю	27
4 Кодування сигналів	28
4.1 Теоретичні відомості і розрахункові співвідношення	28
4.2 Приклади і задачі для самостійного розв'язання	31
4.3 Запитання для самоконтролю	34
5 Проектний розрахунок керуючих обчислювальних засобів	34
5.1 Розрахунки розрядності та дискретності АЦП та ЦАП	34
5.2 Проектування керуючих обчислювальних засобів	36
5.2 Первинна обробка даних в контролерах	38
5.3 Приклади і задачі для самостійного розв'язання	40
6 Проектування локальних мереж	47
6.1 Теоретичні відомості і розрахункові співвідношення	47
6.1.1 Стандарти мережі Ethernet	47
6.1.2 Проектні розрахунки мереж	49
6.2 Приклади і задачі для самостійного розв'язання	52
7 Моделювання локальних мереж	55
7.1 Основні можливості пакету NetCracker Pro	55
7.2 Приклади і задачі для самостійного розв'язання	59

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

CAD (Computer-aided Design) – система автоматизованого проектування

CAM (Computer-aided Manufacturing) – система автоматизованого виробництва

FTP (File Transfer Protocol) — протокол передачі файлів

IPG (InterPacket Gap) – міжпакетний інтервал

LAN (Local Area Network) – локальна обчислювальна мережа

PDV (Path Delay Value) – круговий час проходження сигналу по мережі

PVV (Path Variability Value) – скорочення міжкадрового інтервалу

SQL (Structured Query Language) – мова структурованих запитів баз даних

АС – абонентська станція

АСК ТП – автоматизована система керування технологічним процесом

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика

КІСУ – комп'ютерно-інтегрована система управління

КОЗ – керуючий обчислювальний засіб

КП – кодувальний пристрій

ПЗ – програмне забезпечення

ПІ – пропорційно-інтегральний

ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний

ПКМ – права клавіша миші

ПШС – практична ширина спектра

с.к.в. – середнє квадратичне відхилення

ФЧХ – фазочастотна характеристика

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач

ЦП – цифровий процесор

## ВСТУП

Методичні вказівки призначені для роботи студентів спеціальності 174 під час вивчення дисципліни “Основи комп’ютерно-інтегрованого управління” і мають за мету дати їм основи знань, що необхідні для вирішення виробничих завдань, пов’язаних з проектуванням і обслуговуванням сучасних автоматизованих систем керування. Опанувавши курс, студенти повинні знати принципи побудови, властивості, характеристики сучасних автоматизованих систем керування, вміти вибирати засоби та методи комп’ютеризації управління, мережевого зв’язку, будувати технічну структуру комп’ютерно-інтегрованих систем управління.

Проектування комп’ютерно-інтегрованих систем на основі інформаційних мереж вимагає оцінки частотних і інформаційних властивостей сигналів і каналів для їх передачі. Тому значна увага приділена розрахункам спектральних та ентропійних характеристик сигналів, оцінці пропускну здатності каналів передачі, методам завадостійкого кодування інформації.

Для кращого засвоєння матеріалу навчального посібника його поділено на розділи, кожен з яких містить основні поняття та розрахункові співвідношення для розв’язання практичних задач.

Базовими дисциплінами курсу є “Вища математика”, “Фізика”, “Електричні вимірювання”, “Електроніка та мікросхемотехніка”, “Теорія ймовірностей та випадкові процеси”, “Теорія автоматичного керування”.

У процесі вивчення дисципліни студенти повинні користуватися рекомендованою літературою, перелік якої наведений наприкінці методичних вказівок.

## 1 СИГНАЛИ ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

### 1.1 Частотне зображення періодичних сигналів

Періодичні сигнали можуть бути задані періодичною функцією часу  $X(t)$ , яка на заданому інтервалі має скінчене число максимумів і мінімумів, неперервна всюди, крім скінченного числа точок, в яких вона має розриви першого роду. Відомо, що така функція може бути зображена у вигляді суми гармонічних складових – рядом Фур’є. Ряд Фур’є має дві форми зображення: тригонометричну і комплексну.

Тригонометрична форма розкладання функції має вигляд:

$$X(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{k=1} a_k \cos(k\omega_0 t + \varphi_k), \quad (1.1)$$

де  $\frac{1}{2} a_0$  – стала складова функції;  $a_k \cos(k\omega_0 t + \varphi_k)$  – змінна  $k$ -та гармонічна складова функції,  $a_k, k\omega_0, \varphi_k$  – амплітуда, частота і початкова фаза  $k$ -тої

гармонічної складової;  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$  – частота основної (першої) гармонічної складової;  $T$  – період функції  $X(t)$ .

Комплексна форма розкладання функції у ряд Фур'є має вигляд:

$$X(t) = \frac{1}{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \dot{a}_k e^{jk\omega_0 t}, \quad (1.2)$$

де  $\dot{a}_k$  – комплексна амплітуда гармонічної складової, що має частоту  $\omega_k = k\omega_0$ .

Комплексна амплітуда визначається за допомогою формули:

$$\dot{a}_k = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} X(t) e^{-jk\omega_0 t} dt. \quad (1.3)$$

Сукупність амплітуд і частот гармонічних складових являє собою спектр амплітуд. Особливістю спектра періодичного сигналу є його дискретність. Відстань між сусідніми лініями спектра однакова і дорівнює частоті  $\omega_0$ .

## 1.2 Частотне зображення неперіодичних сигналів

Неперіодичний сигнал можна розглядати як періодичний, період зміни якого дорівнює нескінченності:  $T = \infty$ .

Оскільки  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ , то при  $T \rightarrow \infty$  інтервали між суміжними частотами у спектрі амплітуд стають нескінченно малими величинами, спектр з лінійного стає в суцільний і ряд Фур'є перетворюється в інтеграл, комплексна форма якого має вигляд:

$$X(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(j\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (1.4)$$

де

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (1.5)$$

Величина  $S(j\omega)$  називається спектральною щільністю сигналу.

Амплітудно-частотна і фазо-частотна характеристики сигналу визначаються як модуль та аргумент спектральної щільності:

$$F(\omega) = |S(j\omega)|, \quad (1.6)$$

$$\Phi(\omega) = \arg[S(j\omega)]. \quad (1.7)$$

## 1.3 Практична ширина спектра сигналу

Будь-який реальний сигнал має кінцеву тривалість і тому, згідно (1.4), нескінчений частотний спектр, тобто необмежену смугу частот. При передачі сигналу через реальний канал може бути передана лише частина його спектра.

Доцільним є передавання істотної частини спектра, яку називають практичною (або ефективною) шириною спектра (ПШС).

З енергетичної точки зору ПШС визначається як область частот, у межах якої зосереджена переважна частка всієї потужності сигналу (наприклад, 95%). Для визначення ПШС необхідно знайти відношення

$$\lambda(\omega_i) = \frac{W_i}{W_0}, \quad (1.8)$$

де  $W_0$  – повна енергія сигналу;  $W_i$  – енергія у смузі частот від 0 до  $\omega_i$ ;  $\lambda(\omega_i)$  – інтегральна функція розподілу енергії сигналу у спектрі.

Для розрахунку енергії сигналу використовують формулу:

$$W = \frac{1}{\pi_0} [F(\omega)]^2 d\omega. \quad (1.9)$$

### 1.4 Приклади і задачі для самостійного розв'язання

**Задача 1.1.** Визначити спектр амплітуд періодичної послідовності прямокутних імпульсів тривалістю  $2\tau$ , амплітудою  $A$  і періодом проходження  $T$  (рис. 1.1, а).

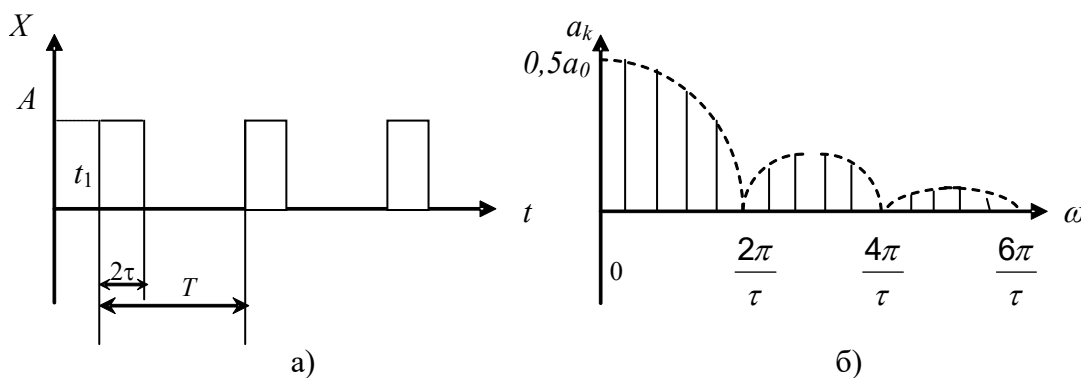


Рис. 1.1

#### Розв'язування

Функція  $X(t)$ , що описує представлений на рис. 1.1, а) сигнал, може бути зображена у вигляді

$$X(t) = \begin{cases} A \text{ при } t_1 + iT < t < t_1 + 2\tau + iT; \\ 0 \text{ при } t_1 + 2\tau + iT < t < t_1 + (i+1)T, \end{cases}$$

де  $i = 0, 1, 2, \dots, \infty$ .

Цю функцію можна представити рядом Фур'є:

$$X(t) = \frac{1}{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \hat{a}_k e^{jk\omega_0 t} = \frac{1}{2} \hat{a}_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \hat{a}_k e^{jk\omega_0 t} + \hat{a}_{-k} e^{-jk\omega_0 t},$$

$$\text{де } \omega_0 = \frac{2\pi}{T}, \quad \hat{a}_k = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} X(t) e^{-jk\omega_0 t} dt = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} A e^{-jk\omega_0 t} dt.$$

Прийmemo  $t_1 = -\tau$ , тоді

$$\dot{a}_k = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} a e^{-jk\omega_0 t} dt = \frac{2A}{T} \frac{e^{-jk\omega_0 t}}{(-jk\omega_0)} \Big|_{-\tau}^{\tau} = \frac{2A}{Tjk\omega_0 j} (e^{jk\omega_0 \tau} - e^{-jk\omega_0 \tau}).$$

Відомо, що  $\frac{1}{2j}(e^{jk\omega_0 \tau} - e^{-jk\omega_0 \tau}) = \sin k\omega_0 \tau$ , а  $T\omega_0 = 2\pi$ . Тоді

$$\dot{a}_k = \frac{2A}{2\pi k j} (e^{jk\omega_0 \tau} - e^{-jk\omega_0 \tau}) = \frac{2A}{k\pi} \sin k\omega_0 \tau;$$

модуль амплітуди

$$a_k = |\dot{a}_k| = \frac{2A}{\pi} \frac{1}{k} \sin k\omega_0 \tau;$$

$$a_0 = \lim_{k \rightarrow 0} \frac{2A}{k\pi} \sin k\omega_0 \tau = \frac{2A}{\pi} \lim_{k \rightarrow 0} \frac{\sin k\omega_0 \tau}{k} \frac{2A}{\pi}.$$

Підставимо отримані значення у формулу (1.1) ряду Фур'є:

$$X(t) = \frac{2A}{\pi} \frac{1}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin k\omega_0 \tau}{k} \cos k\omega_0 t.$$

Побудуйте графік спектру амплітуд самостійно.

**Задача 1.2.** Знайти спектр одиничного прямокутного імпульсу з амплітудою  $A$  і тривалістю  $2\tau$  (рис. 1.2, а).

### Розв'язування

Використовуючи (1.5), визначимо:

$$S(j\omega) = \int_{-\tau}^{\tau} X(t) e^{-j\omega t} dt = \int_{-\tau}^{\tau} A e^{-j\omega t} dt = \frac{A}{-j\omega} e^{-j\omega t} \Big|_{-\tau}^{\tau} = \frac{2A}{\omega} \frac{(e^{j\omega \tau} - e^{-j\omega \tau})}{2j};$$

$$S(j\omega) = \frac{2A}{\omega} \sin \omega \tau = \frac{2A}{\omega} \frac{\tau}{\tau} \sin \omega \tau = 2A\tau \frac{\sin \omega \tau}{\omega \tau}.$$

Модуль спектральної щільності

$$F(\omega) = |S(j\omega)| = 2A\tau \left| \frac{\sin \omega \tau}{\omega \tau} \right|.$$

Відомо, що  $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = 1$ . Тому при нульовій частоті амплітуда сигналу є рівною  $2A\tau$ . Графік зміни модуля спектральної щільності показаний на рис. 1.2, б).

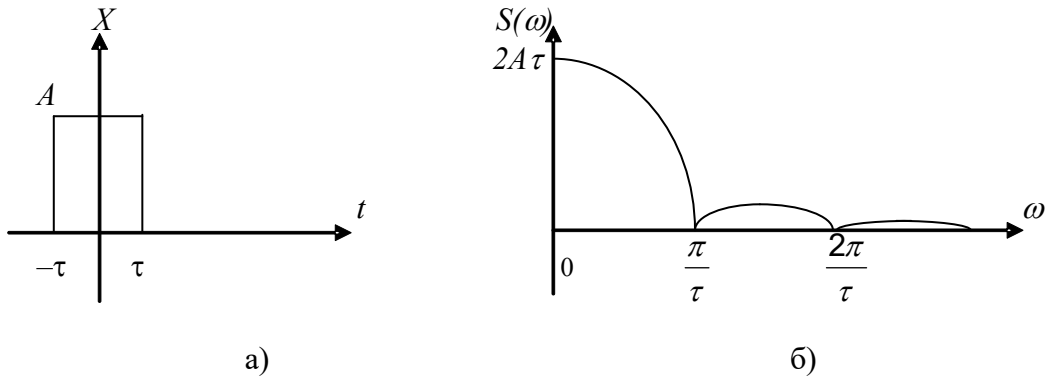


Рис. 1.2

**Задача 1.3.** Знайти ПШС, в якій зосереджено 90% усієї енергії сигналу, для одиничного прямокутного імпульсу струму з амплітудою  $A$  і тривалістю  $2\tau$  (рис. 1.2, а).

### Розв'язування

Для визначення ПШС треба побудувати графік функції (1.7).

З курсу фізики відомо, що енергія, яка виділяється струмом  $i(t)$  у резисторі 1 Ом, визначається виразом:

$$W_0 = \int_{-\tau}^{\tau} [i(t)]^2 dt.$$

Знайдемо повну енергію одиничного імпульсу:

$$W_0 = \int_{-\tau}^{\tau} [i(t)]^2 dt = \int_{-\tau}^{\tau} A^2 dt = 2\tau A^2.$$

Енергія у смузі частот від 0 до  $\omega_i$  може бути визначена виразом (1.8):

$$W_i = \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_i} [F(\omega)]^2 d\omega.$$

У задачі 1.2 знайдено значення модулю спектральної щільності  $S(\omega)$ . Підставимо його у попередню формулу:

$$W_i = \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_i} \frac{2A}{\omega} \sin \omega\tau \, d\omega = \frac{4A^2}{\pi} \int_0^{\omega_i} \frac{\sin \omega\tau}{\omega} \, d\omega.$$

Підставивши  $W_0$  і  $W_i$  в (1.7), одержимо формулу:

$$\lambda(\omega_i) = \frac{W_i}{W_0} = \frac{2}{\pi\tau} \int_0^{\omega_i} \frac{\sin \omega\tau}{\omega} \, d\omega = \frac{2\tau}{\pi} \int_0^{\omega_i} \frac{\sin \omega\tau}{\omega\tau} \, d\omega.$$

Графік цієї функції, отриманий у програмному середовищі MatLAB, показаний на рис. 1.3. Тут на осі абсцис відкладається відносна величина

$$\frac{\omega_i\tau}{\pi}.$$

Для практичних цілей ПШС оцінюють величиною  $\frac{\omega_i \tau}{\pi} = 1$ , тобто  $\omega_i = \frac{\pi}{\tau}$ . Якщо порівняємо зі спектром прямокутного імпульсу (рис. 1.2, б), то виявимо, що 90-відсоткова ПШС імпульсу співпадає з першою «пелюсткою» спектра (від нуля до першого перетину графіка з віссю абсцис).

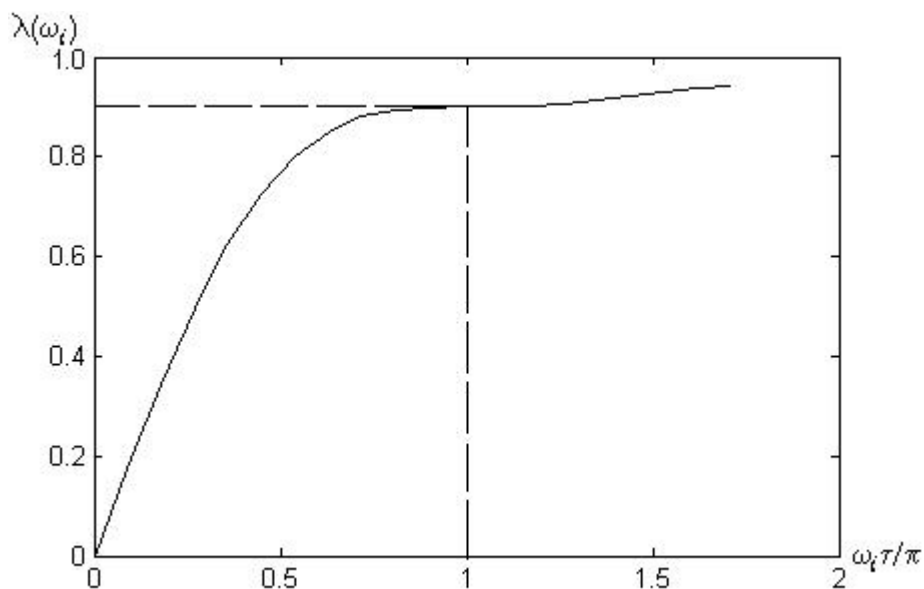


Рис. 1.3

**Задача 1.4.** Розрахувати і побудувати амплітудно-частотну (АЧХ) і фазо-частотну (ФЧХ) характеристики спектральної щільності імпульсу електричної напруги, зображеного на рис. 1.4. Амплітуда  $U$ , тривалість  $\tau$  наведені в табл. 1.1. Визначити практичну ширину спектру імпульсу  $\Delta f$ .

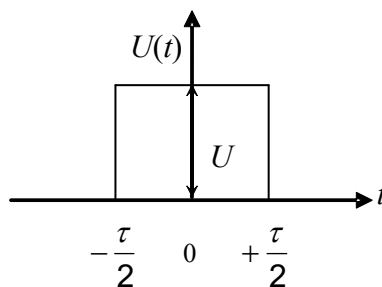


Рис. 1.4

Таблиця 1.1 – Вихідні дані до задачі 1.4

Варіант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U, В	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
τ, мс	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0

**Задача 1.5.** Визначити спектр амплітуд і спектр фаз експоненціального імпульсу, математична модель якого має вигляд:

$$X(t) = ae^{-bt},$$

де  $t \geq 0$ ,  $a$  та  $b$  беруться з табл. 1.2. Побудувати відповідні графіки.

Таблиця 1.2– Вихідні дані до задачі 1.5

Варіант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
a	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
b	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0

**Задача 1.6.** Визначити АЧХ і ФЧХ сигналу, що описується дельта-функцією наступного вигляду:

$$\delta(t - t_d) = \begin{cases} \text{при } t = t_d \\ 0 \text{ при } t \neq t_d \end{cases}$$

Час дії імпульсу взяти рівним номеру варіанту.

### 1.5 Запитання для самоконтролю

1. Дайте характеристику основним елементарним сигналам.
2. Що розуміється під описом сигналу?
3. Які характеристики сигналу можна одержати з його спектрального аналізу?
4. Що таке спектр сигналу?
5. Як визначається практична ширина спектра сигналу?
6. Що таке інтегральна функція розподілу енергії сигналу у спектрі?

## 2 ІНФОРМАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛІВ

### 2.1 Ентропія дискретних повідомлень

Форма представлення інформації називається повідомленням. Повідомлення являє собою сукупність знаків або первинних сигналів, що містять інформацію. Повідомлення поділяють на дискретні і неперервні.

Суб'єкт або об'єкт, що породжує інформацію і представляє її у вигляді повідомлення, називають джерелом інформації.

Дискретне джерело інформації володіє кінцевим алфавітом, що складається з  $n$  елементів  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , кожен з яких характеризується ймовірностями  $P(x_1), P(x_2), \dots, P(x_n)$ . Сукупність елементів та їх ймовірності зручно задавати у вигляді матриці

$$\begin{matrix} \|X\| \\ \|P\| \end{matrix} = \begin{matrix} \|x_1 & x_2 & \dots & x_n\| \\ \|P_1 & P_2 & \dots & P_n\| \end{matrix}$$

Чисельною характеристикою невизначеності появи елемента  $x_i$  виступає часткова ентропія, яка є тим більшою, чим менша ймовірність  $P(x_i)$ :

$$H(x_i) = -\log_a P(x_i). \quad (2.1)$$

Вибір основи логарифмів неістотний. Будемо використовувати двійкові логарифми і визначати кількість ентропії та інформації у бітах на повідомлення.

Для всієї сукупності дискретних повідомлень ентропія визначається усередненням за ймовірностями всіх повідомлень:

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n P(x_i) \log P(x_i). \quad (2.2)$$

Ентропія дорівнює нулю, коли ймовірність одного значення  $x_i$  дорівнює одиниці, а інших значень – нулю, тобто маємо безальтернативне повідомлення. Ентропія максимальна, якщо всі повідомлення рівноймовірні, тобто  $P(x_1)=P(x_2)=\dots=P(x_n)=1/n$ . При цьому ентропія

$$H(X) = - \frac{1}{n} \log \frac{1}{n} = \log n. \quad (2.3)$$

При обчисленні ентропії порівняно мало ймовірні результати можна без великої помилки виключити. Внеском складових формули (2.2), для яких  $P(x_i) > 0,95$  або  $P(x_i) < 0,05$ , можна нехтувати.

Розглянемо далі множину двох повідомлень  $X$  та  $Y$ . Якщо вони взаємонезалежні, ентропія сукупності повідомлень дорівнює сумі ентропій:

$$H(X, Y) = H(X) + H(Y). \quad (2.4)$$

Якщо ж між повідомленнями існує статистичний зв'язок, то ентропія сукупності визначається наступним чином:

$$H(X, Y) = H(X) + H(Y/X) = H(Y) + H(X/Y) < H(X) + H(Y). \quad (2.5)$$

Як бачимо, наявність статистичного зв'язку між повідомленнями зменшує їх сумісну ентропію.

Тут  $H(Y/X)$ ,  $H(X/Y)$  – умовна ентропія, що визначається виразами:

$$H(Y/X) = - \sum P(x, y) \log P(y/x); \quad (2.6)$$

$$H(X/Y) = - \sum P(x, y) \log P(x/y), \quad (2.7)$$

де  $P(x, y)$  – сумісна ймовірність,  $P(y/x)$ ,  $P(x/y)$  – умовні ймовірності.

Таким ж чином зменшується ентропія повідомлення  $X$ , якщо між його елементами існує статистичний зв'язок. Часткова ентропія значення  $x_i$  при умові, що перед тим було отримане значення  $x_j$ :

$$H(X/x_j) = - \sum_i P(x_i/x_j) \log P(x_i/x_j). \quad (2.8)$$

Загальну умовну ентропію знайдемо усередненням за ймовірностями  $P(x_j)$ :

$$H(X/X) = - \sum_j P(x_j) \sum_i P(x_i/x_j) \log P(x_i/x_j) = - \sum_j \sum_i P(x_i, x_j) \log P(x_i/x_j). \quad (2.9)$$

## 2.2 Ентропія неперервних повідомлень

Повідомлення, які передаються неперервними сигналами, є неперервними. Неперервне повідомлення  $x(t)$  як випадковий процес описується густиною  $f(x)$  розподілу ймовірностей.

Розіб'ємо діапазон значень неперервного повідомлення на невеликі ділянки  $\Delta x_i$ . Ширина ділянки визначається абсолютною похибкою вимірювання величини  $x(t)$ . Ймовірність попадання значення повідомлення в інтервал  $\Delta x_i$  приблизно дорівнює  $f(x_i) \cdot \Delta x_i$ , де  $f(x_i)$  – густина ймовірності для точки, що лежить посередині  $\Delta x_i$ . Тоді ентропію неперервного повідомлення можна визначити так:

$$H(X) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} - \sum_i f(x_i) \Delta x_i \log f(x_i) \Delta x_i = - \int f(x) \log f(x) dx - \int f(x) dx \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \log \Delta x.$$

Враховуючи, що  $\int f(x) dx = 1$ , отримаємо:

$$H(X) = - \int f(x) \log f(x) dx - \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \log \Delta x = h(X) - \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \log \Delta x. \quad (2.10)$$

Перша складова виразу (2.10)

$$h(X) = - \int f(x) \log f(x) dx. \quad (2.11)$$

називається диференціальною ентропією неперервного повідомлення. Друга складова при  $\Delta x = const$  набуває сталого значення і з розгляду виключається.

Якщо закон розподілу величини  $X$  рівномірний, то густина ймовірностей

$$f(x) = \frac{1}{X_{\max} - X_{\min}}.$$

Диференціальна ентропія рівномірно розподіленої величини

$$h(X) = - \int_{X_{\min}}^{X_{\max}} \frac{1}{X_{\max} - X_{\min}} \cdot \log \frac{1}{X_{\max} - X_{\min}} dx = \log(X_{\max} - X_{\min}), \quad (2.12)$$

а повна ентропія

$$H(X) = h(X) - \log \Delta x = \log \frac{X_{\max} - X_{\min}}{\Delta x}. \quad (2.13)$$

Для нормального закону розподілу

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(X)} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2(X)}}, \quad (2.14)$$

де  $\sigma(X)$  – середньоквадратичне відхилення значень  $X$ .

Диференціальна ентропія

$$h(X) = - \int_{X_{\min}}^{X_{\max}} f(X) \log f(X) dx = \log[(\sqrt{2\pi e} \sigma(X))]. \quad (2.15)$$

Повна ентропія сигналу з нормальним розподілом:

$$H(X) = h(X) - \log \Delta x = \log \frac{(\sqrt{2\pi e} \sigma(X))}{\Delta x} . \quad (2.16)$$

### 2.3 Розрахунок кількості інформації

Якщо  $x_1, x_2, \dots, x_n$  є значеннями джерела повідомлень  $X$  з апіорними ймовірностями  $P(x_1), P(x_2), \dots, P(x_n)$ , то  $H(X)$  – це середня невизначеність стану джерела. Внаслідок передачі повідомлення  $X$  через канал зв'язку на його виході одержуємо повідомлення  $Z$  зі значеннями  $z_1, z_2, \dots, z_n$ .

Наявність завад у каналі передачі порушує однозначну відповідність між сигналами  $Z$  та  $X$ . Отже, приймаючи повідомлення  $z_j$ , неможливо точно встановити, яке зі значень  $X$  було передане. Можна лише говорити про умовну ймовірність передачі значення  $x_i$  за умови, що було прийняте значення  $z_j$ . У випадку отримання значення  $z_j$  апостеріорні ймовірності значень джерела повідомлень будуть умовними  $P(x_1/z_j), P(x_2/z_j), \dots, P(x_n/z_j)$ . Невизначеність відносно переданого значення оцінюється згідно (2.1) частковою умовною ентропією

$$H(x_i/z_j) = -\log P(x_i/z_j). \quad (2.17)$$

Кількість одержаної при цьому інформації на одне значення (часткової інформації) є різниця між початковою і остаточною невизначеностями:

$$I(z_j/x_i) = H(x_i) - H(x_i/z_j) = \log \frac{P(x_i/z_j)}{P(x_i)}. \quad (2.18)$$

Середня кількість інформації про всі значення повідомлення  $X$  одержується шляхом усереднення за умовними ймовірностями:

$$I(z_j/X) = \sum_i P(x_i/z_j) I(z_j/x_i) = \sum_i P(x_i/z_j) \log \frac{P(x_i/z_j)}{P(x_i)}. \quad (2.19)$$

Здійснивши усереднення (2.19) за всіма ймовірностями значень  $z_j$ , дістанемо формулу визначення кількості інформації про всю сукупність  $X$  у сигналі  $Z$ :

$$I(Z/X) = \sum_j P(z_j) I(z_j/X) = \sum_j P(z_j) \sum_i P(x_i/z_j) \log \frac{P(x_i/z_j)}{P(x_i)}. \quad (2.20)$$

Згідно формули сумісної ймовірності  $P(z_j)P(x_i/z_j) = P(x_i, z_j)$ . Таким чином

$$I(Z/X) = \sum_j \sum_i P(x_i, z_j) \log \frac{P(x_i, z_j)}{P(x_i)P(z_j)}. \quad (2.21)$$

У результаті алгебраїчних перетворень формулу (2.21) можна представити і так

$$I(Z/X) = - \sum_i P(x_i) \log P(x_i) + \sum_j P(z_j) \sum_i P(x_i/z_j) \log P(x_i/z_j) = H(X) - H(X/Z). \quad (2.22)$$

Тут  $H(X/Z)$  – умовна ентропія:

$$H(X/Z) = - \sum_j P(z_j) \sum_i P(x_i/z_j) \log P(x_i/z_j) = - \sum_j P(x_i, z_j) \log P(x_i/z_j). \quad (2.23)$$

Для переходу до неперервних повідомлень виразимо ймовірності через функції густини ймовірностей

$$\begin{aligned} P(x_i) &= f(x_i) \Delta x_i; \\ P(x_i/z_j) &= f(x_i/z_j) \Delta x_i; \\ P(x_i, z_j) &= f(x_i, z_j) \Delta x_i \Delta z_j. \end{aligned}$$

Підставимо ці вирази у формули (2.22) та (2.23) і, здійснивши граничний перехід при  $\Delta x_i \rightarrow 0, \Delta z_i \rightarrow 0$ , одержимо:

$$I(Z/X) = - \int f(X) \log f(X) dX + \int f(X, Z) \log f(X/Z) dXdZ = h(X) - h(X/Z). \quad (2.24)$$

## 2.4 Інформаційні характеристики випадкових похибок

Очевидно, що в процесі вимірювання отримується певна інформація про вимірювану величину, інакше кажучи, зменшується її невизначенність. Якби результат вимірювання цілком безумовно відповідав істинному значенню вимірюваної величини, можна було б вважати, що в результаті вимірювання невизначенність повністю усунута. Проте погрішність вимірювання призводить до того, що певний ступінь дезінформації залишається і після вимірювання.

Кількісно апріорна невизначенність вимірюваної величини  $X$  (яку слід розглядати як випадкову) визначається її диференційною ентропією (п. 2.2).

Припустимо, перед вимірюванням відомо, що значення вимірюваної величини  $X$  лежать в діапазоні від  $X_{\min}$  до  $X_{\max}$ , причому всі значення в цьому діапазоні рівномірні (рис. 2.1). Після отримання результату вимірювання з похибкою  $\pm \varepsilon$  зона невизначенності вимірюваної величини звужується від інтервалу  $[X_{\min}, X_{\max}]$  до  $[X_i - \varepsilon, X_i + \varepsilon]$ .

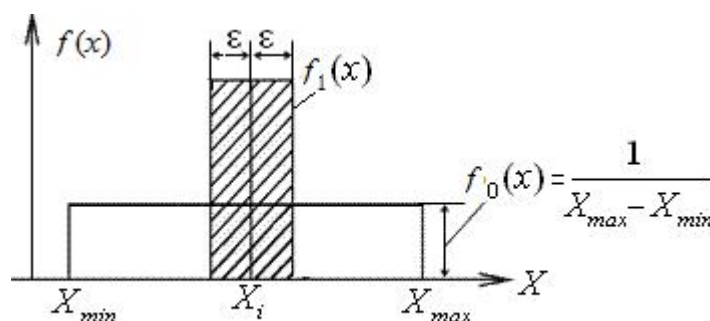


Рис. 2.1

Апріорна ентропія визначається формулою (2.12). Якщо похибка вимірювання має рівномірний розподіл з граничними значеннями  $\pm \varepsilon$ , то, згідно тієї ж формули (2.12), ентропія після вимірювання визначається як

$$h(X / \varepsilon) = \log(2\varepsilon). \quad (2.25)$$

У випадку нормального закону розподілу ентропія розраховується за формулою (2.15).

Кількість інформації, що отримується в результаті вимірювання, є рівною різниці ентропій до і після вимірювання:

$$I(X / \varepsilon) = h(X) - h(X / \varepsilon). \quad (2.26)$$

## 2.5 Приклади і задачі для самостійного розв'язання

*Для розрахунків значень логарифмічних функцій можна користуватись таблицею у Додатку А.*

**Задача 2.1.** На вхід каналу передачі надходять сигнали, які в момент  $t_1$  дорівнюють  $x_1=20$  В,  $x_2=19$  В,  $x_3=21$  В. Ймовірності появи сигналів дорівнюють:  $P(x_1)=0,9$ ,  $P(x_2)=0,07$ ,  $P(x_3)=0,03$ . В момент  $t_2$  надходять сигнали  $x_1=30$  В,  $x_2=27$  В,  $x_3=33$  В. Ймовірності появи цих сигналів дорівнюють:  $P(x_1)=0,07$ ,  $P(x_2)=0,9$ ,  $P(x_3)=0,03$ . Визначити ентропію дискретних повідомлень для моментів часу  $t_1$  та  $t_2$ .

### Розв'язування

Відповідно до формули (2.2) знаходимо:

$$H(X, t_1) = -0,9 \log 0,9 - 0,07 \log 0,07 - 0,03 \log 0,03 = 0,558 \text{ біт};$$

$$H(X, t_2) = -0,07 \log 0,07 - 0,9 \log 0,9 - 0,03 \log 0,03 = 0,558 \text{ біт}.$$

Як бачимо,  $H(X, t_1) = H(X, t_2)$ , хоча сигнали набувають різних фізичних значень.

**Задача 2.2.** На вхід каналу передачі надходять сигнали, ймовірності появи яких дорівнюють:  $P(x_1)=0,01$ ,  $P(x_2)=0,7$ ,  $P(x_3)=0,29$ . Визначити ентропію дискретних повідомлень та порівняти  $H(x_1, x_2, x_3)$  і  $H(x_2, x_3)$ .

### Розв'язування

Відповідно до формули (2.2) знаходимо:

$$H(x_1, x_2, x_3) = -0,01 \log 0,01 - 0,7 \log 0,7 - 0,29 \log 0,29 = 0,944 \text{ біт}.$$

$$H(x_2, x_3) = -0,7 \log 0,7 - 0,29 \log 0,29 = 0,878 \text{ біт}.$$

Порівнюючи  $H(x_1, x_2, x_3)$  і  $H(x_2, x_3)$ , знаходимо, що ентропія  $H(x_2, x_3)$  складає 93% ентропії  $H(x_1, x_2, x_3)$ . Звідси випливає, що коли виконуються розрахунки з точністю 7%, то внеском складової ентропії значення  $x_1$  можна знехтувати.

**Задача 2.3.** Визначити ентропію повідомлень системи, яка контролює параметр  $X$ . Параметр  $X$  може набувати значень:  $x_1$  – норма;  $x_2$  – більше норми;  $x_3$  – менше норми з ймовірностями, наведеними в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані до задачі 2.3

Параметр	Остання цифра номера варіанту									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P(x_1)$	0,8	0,85	0,76	0,75	0,6	0,65	0,5	0,45	0,4	0,35
Параметр	Передостання цифра номера варіанту									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P(x_2)$	0,15	0,12	0,1	0,2	0,3	0,21	0,35	0,4	0,45	0,5

**Задача 2.4.** Визначити диференціальну та повну ентропію вимірів з погрішністю 2%, якщо вимірювана величина розподілена за рівномірним законом у межах від нуля до значення, рівного номеру варіанта.

**Задача 2.5.** Визначити диференціальну ентропію вимірів величини  $X$ , якщо її значення розподілені за експоненціальним законом:

$$p(X) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda X} & \text{при } X \geq 0; \\ 0 & \text{при } X < 0. \end{cases}$$

Значення  $\lambda$  прийняти рівним номеру варіанта, поділеному на 10.

**Задача 2.6.** Визначити кількість інформації на виході системи, яка контролює параметр  $X$ . Параметр  $X$  може набувати значень:  $x_1$  – норма;  $x_2$  – більше норми;  $x_3$  – менше норми з ймовірностями:  $P(x_1)=0,9$ ;  $P(x_2)=0,05$ ;  $P(x_3)=0,05$ . Внаслідок завад мають місце помилки, тобто замість  $x_1$  може бути зафіксовано  $x_2$  або  $x_3$ , замість  $x_2$  –  $x_1$  або  $x_3$ , замість  $x_3$  –  $x_1$  або  $x_2$ . Умовні ймовірності таких подій дорівнюють 0,01.

### Розв'язування

Введемо позначення для результатів контролю:  $z_1$  – система контролю вказує, що параметр має значення  $x_1$ ,  $z_2$  – що параметр має значення  $x_2$ ,  $z_3$  – що параметр має значення  $x_3$ . Тоді умовні ймовірності:

$$P(z_1/x_2)=0,01; P(z_1/x_3)=0,01; P(z_1/x_1)=0,98;$$

$$P(z_2/x_1)=0,01; P(z_2/x_3)=0,01; P(z_2/x_2)=0,98;$$

$$P(z_3/x_1)=0,01; P(z_3/x_2)=0,01; P(z_3/x_3)=0,98.$$

На підставі (2.22) одержимо:

$$I(Z/X) = H(X) - H(X/Z);$$

$$H(X) = - \sum_i P(x_i) \log P(x_i) = -0,9 \log 0,9 - 2(0,05 \log 0,05) = 0,569 \text{ біт.}$$

За формулою повної ймовірності

$$P(z_j) = \sum_i P(x_i) P(z_j / x_i),$$

тобто

$$P(z_1)=0,9 \cdot 0,98+0,05 \cdot 0,01+0,05 \cdot 0,01=0,883;$$

$$P(z_2)=0,9 \cdot 0,01+0,05 \cdot 0,98+0,05 \cdot 0,01=0,0585;$$

$$P(z_3)=0,9 \cdot 0,01+0,05 \cdot 0,01+0,05 \cdot 0,98=0,0585.$$

Умовні ймовірності  $P(x_i/z_j)$  визначимо за формулою Байєса:

$$P(x_i / z_j) = \frac{P(x_i)P(z_j / x_i)}{P(z_j)};$$

$$P(x_1/z_1)=0,9989; P(x_1/z_2)=0,15386; P(x_1/z_3)=0,15386;$$

$$P(x_2/z_1)=0,00055; P(x_2/z_2)=0,83761; P(x_2/z_3)=0,00854;$$

$$P(x_3/z_1)=0,00055; P(x_3/z_2)=0,00854; P(x_3/z_3)=0,83761.$$

Умовна ентропія

$$H(X/Z) = - \sum_j P(z_j) \sum_i P(x_i / z_j) \log P(x_i / z_j) = 0,0928 \text{ біт.}$$

Кількість інформації

$$I(Z/X) = 0,569 - 0,094 = 0,4762 \text{ біт.}$$

**Задача 2.7.** Вимірювана величина змінюється від  $X_0$  до  $X_0+A$  і розподілена за законом рівної ймовірності, а похибка вимірювання – за нормальним. Дисперсія похибки дорівнює  $8/(\pi e)$ . Визначити кількість інформації в одному вимірі, якщо  $A=256$ .

**Розв'язування**

Згідно з законом рівної ймовірності

$$p(X) = \begin{cases} \frac{1}{A} & \text{при } X_0 < X < X_0 + A; \\ 0 & \text{при } X_0 > X > X_0 + A. \end{cases}$$

Згідно (2.4) диференціальна ентропія

$$h(X) = - \int_{X_0}^{X_0+A} p(X) \log p(X) dX = - \int_{X_0}^{X_0+A} \frac{1}{A} \log \frac{1}{A} dX = \log A = \log 256 = 8 \text{ біт/вимір.}$$

Згідно з нормальним законом розподілу

$$p(X/\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(X)^2}{2\sigma^2}}.$$

Умовна ентропія

$$h(X/\sigma) = - \int p(X/\sigma) \log p(X/\sigma) dX = \log \sqrt{2\pi\sigma^2} + \frac{1}{2} \log e = \log \sqrt{2\pi e \sigma^2} \text{ біт/вимір.}$$

Оскільки дисперсія  $\sigma^2 = \frac{8}{\pi e}$ , то

$$h(X/\sigma) = \log \sqrt{2\pi e \frac{8}{\pi e}} = \log 4 = 2 \text{ біт/вимір.}$$

Кількість інформації

$$I(X/\sigma) = h(X) - h(X/\sigma) = 8 - 2 = 6 \text{ біт/вимір.}$$

**Задача 2.8.** Неперервна випадкова величина  $X$  розподілена згідно нормального закону. Вона вимірюється з похибкою  $\Delta$ , що також підкоряється нормальному розподілу. Вихідний величиною є випадкова величина  $Z=X+\Delta$ . Чому дорівнює кількість інформації, якщо  $X$  і  $\Delta$  незалежні, їх середні значення дорівнюють 0, а дисперсії  $\sigma^2_X = 16$ ,  $\sigma^2_\Delta = 9$ ?

**Задача 2.9.** На вході каналу передачі сигнал  $X$  набуває значень  $x_1; x_2; x_3$  з ймовірностями:  $P(x_1)=0,8; P(x_2)=0,1; P(x_3)=0,1$ . Визначити кількість інформації у повідомленні  $Z$ , що надходить до одержувача, якщо ймовірності значень сигналу  $Z$  є рівними  $P(z_1)=0,6; P(z_2)=0,2; P(z_3)=0,2$ , а умовні ймовірності  $P(z_j/x_i)$  дорівнюють наведеним у таблиці 2.2.

### Розв'язування

Кількість інформації визначається формулою:

$$I(Z/X) = H(X) - H(X/Z).$$

Таблиця 2.2 – Вихідні дані до задачі 2.9

	$x_1$	$x_2$	$x_3$
$z_1$	0,9	0,04	0,06
$z_2$	0,1	0,8	0,1
$z_3$	0	0,16	0,84

Ентропія сигналу  $X$ :

$$H(X) = - \sum_i P(x_i) \log P(x_i) = -0,8 \log 0,8 - 2(0,1 \log 0,1) = 0,922 \text{ біт.}$$

Умовна ентропія  $H(X/Z)$ :

$$H(X/Z) = - \sum_j P(z_j) \sum_i P(x_i/z_j) \log P(x_i/z_j) = -0,6(0,9 \log 0,9 + 0,04 \log 0,04 + 0,06 \log 0,06) - 0,2(0,1 \log 0,1 + 0,8 \log 0,8 + 0,1 \log 0,1) - 0,2(0,16 \log 0,16 + 0,84 \log 0,84) = 0,651 \text{ біт.}$$

Кількість інформації у повідомленні  $Z$  про сигнал  $X$ :

$$I(Z/X) = 0,92 - 0,611 = 0,271 \text{ біт.}$$

**Задача 2.10.** Вимірювана величина і похибка вимірювання розподілені за законом рівної ймовірності (див. рис. 2.1). Визначити кількість інформації в одному вимірі, якщо вимірювана величина представлена сигналом 4–20 мА, а точність вимірювання  $\pm 1$  мА.

**Задача 2.11.** Для умов задачі 2.6 визначити кількість інформації на виході системи, якщо ймовірності значень параметра  $X$  дорівнюють  $P(x_1), P(x_2), P(x_3)$  (див. табл. 2.3), а умовні ймовірності помилок дорівнюють  $Q$ .

Таблиця 2.3 – Вихідні дані до задачі 2.11

Параметр	Остання цифра шифру									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P(x_1)$	0,95	0,92	0,85	0,82	0,8	0,78	0,76	0,72	0,7	0,65
$P(x_2)$	0,03	0,04	0,07	0,08	0,05	0,08	0,09	0,1	0,2	0,15
$P(x_3)$	0,02	0,04	0,08	0,1	0,15	0,14	0,15	0,18	0,1	0,2
$Q$	Передостання цифра шифру									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2	0,22	0,24	0,26	0,28

## 2.6 Запитання для самоконтролю

1. Поясніть суть поняття “ентропія”.
2. Сформулюйте основні властивості ентропії.
3. Що таке диференціальна ентропія?
4. Поясніть зв’язок між ентропією і інформацією.
5. Як кількісно оцінюється інформація дискретних сигналів?
6. Як кількісно оцінюється інформація неперервних сигналів?

## 3 ПРОПУСКНА СПРОМОЖНІСТЬ КАНАЛУ ПЕРЕДАЧІ

### 3.1 Теоретичні відомості і розрахункові співвідношення

#### 3.1.1 Дискретний канал без завад

При передаванні по каналу зв’язку досить великої кількості вимірювальної інформації швидкість передачі можна вважати постійною і визначати за формулою

$$R = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{I_T(Z, X)}{T} = \text{const} , \quad (3.1)$$

де  $I_T(Z, X)$  – кількість інформації, яка передається за час  $T$ .

Швидкість передачі залежить від методу кодування, властивостей каналу та інших факторів. Найбільша можлива для каналу швидкість передачі називається пропускною спроможністю каналу

$$C = \sup \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{I_T}{T} . \quad (3.2)$$

У каналі без завад кожному значенню вхідного сигналу  $x_i$  відповідає теж саме значення сигналу на виході  $z_j = x_i$ . У цьому випадку середня кількість інформації дорівнює ентропії:

$$I(Z/X) = H(X).$$

Швидкість передачі інформації

$$R = \frac{H(X)}{\tau_{cp}}, \quad (3.3)$$

де  $\tau_{cp}$  – середня тривалість передачі одного елемента інформації. При відсутності статистичної залежності між елементами:

$$\tau_{cp} = \sum_i P(x_i) \tau_{x_i}. \quad (3.4)$$

Максимально можлива кількість інформації має місце при рівномірному розподілі ймовірностей елементів інформації:

$$I_{\max}(Z/X) = H_0(X) = \log n,$$

де  $n$  – кількість таких елементів.

Пропускна спроможність каналу без завад

$$C = \sup \frac{H(X)}{\tau_{cp}}. \quad (3.5)$$

У випадку передачі  $n$  рівноймовірних елементів інформації:

$$C = \frac{\log n}{\tau_{cp}} = R_{cp} \log n, \quad (3.6)$$

де  $R_{cp} = \frac{1}{\tau_{cp}}$  – середня швидкість передачі одного елемента інформації.

### 3.1.2 Дискретний канал із завадами

При наявності завад у каналі передачі маємо ймовірнісний характер зв'язку між вхідним і вихідним сигналами каналу, який записується у вигляді матриці перехідних ймовірностей

$$\|P(z_j / x_i)\|, \quad (3.7)$$

де  $P(z_j / x_i)$  – ймовірність заміни  $i$ -го значення сигналу на вході каналу  $j$ -тим значенням сигналу на виході.

Середня кількість інформації визначається формулою (2.22) і залежить від законів розподілу ймовірностей значень сигналу  $X$  та умовних ймовірностей (3.7). Пропускна спроможність каналу з завадами обчислюється за формулою:

$$C = R_{cp} I_{\max}(Z, X), \quad (3.8)$$

де  $I_{\max}(Z, X)$  обчислюється за формулою (2.22) за всіма можливими розподілами ймовірності, які характеризують джерело інформації.

У випадку передачі двійкових кодів при рівній ймовірності появи нуля чи одиниці розрахунок кількості інформації будемо проводити наступним чином. Вважаємо, що джерело інформації виробляє два значення сигналу  $x_1=0$ ,  $x_2=1$ . Якщо ймовірність помилки передачі позначити  $Q$ , можна побудувати граф перехідних ймовірностей (рис. 3.1).

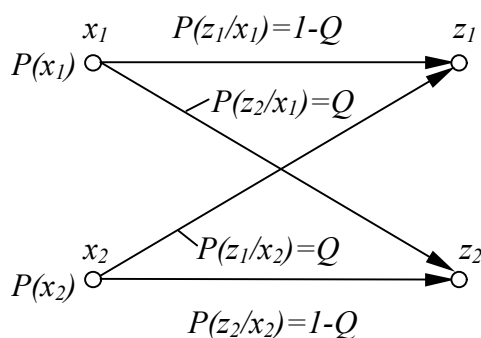


Рис. 3.1

Апостеріорні ймовірності значень сигналу  $P(x_1)=P(x_2)=0,5$ . В силу симетричності графа апостеріорні ймовірності також будуть однакові:  $P(z_1)=P(z_2)=0,5$ . Матриця перехідних ймовірностей

$$\|P(z_j / x_i)\| = \begin{vmatrix} Q & (1-Q) \\ (1-Q) & Q \end{vmatrix}, \quad (3.9)$$

Згідно формули Байєса

$$P(x_i / z_j) = \frac{P(x_i)P(z_j / x_i)}{P(z_j)}.$$

Оскільки  $P(x_i)=P(z_j)=0,5$ , то  $P(x_i / z_j)=P(z_j / x_i)$ .

Кількість інформації  $I(Z / X) = H(X) - H(X / Z)$ . Ентропія сигналу, що приймає  $n$  рівноймовірних значень  $H(X) = \log n = \log 2 = 1$ . Умовна ентропія

$$H(X / Z) = - \sum_j P(z_j) \sum_i P(x_i / z_j) \log P(x_i / z_j) = -2 \cdot 0,5 [Q \log Q + (1-Q) \log(1-Q)].$$

Отже, кількість інформації, що передається одним розрядом двійкового коду

$$I(Z / X) = 1 + Q \log Q + (1-Q) \log(1-Q). \quad (3.10)$$

### 3.1.3 Неперервний канал без завад

Неперервний сигнал розглядають як ліміт дискретного при зменшенні до нуля двох величин: кванта  $\Delta X$  сигналу при його квантуванні і параметра дискретизації у часі  $\Delta T$ .

Інтервал дискретизації визначається теоремою Котельникова

$$\Delta T \leq \frac{1}{2f_c}, \quad (3.11)$$

де  $f_c$  – найбільша частота спектру сигналу. Інтервал  $\Delta T$  визначає необхідну мінімальну швидкість передачі імпульсів дискретизованого сигналу по каналу передачі:

$$R_{cp} = \frac{1}{\Delta T} = 2f_c, \quad (3.12)$$

Максимальна кількість інформації у квантованому сигналі

$$I_{\max}(Z, X) = H_{\max}(X) = \log m = \log \left( \frac{X_{\max}}{\Delta X} + 1 \right), \quad (3.13)$$

де  $m$  кількість рівнів квантування, які містяться в інтервалі можливої зміни сигналу  $0 \leq X \leq X_{max}$ .

### 3.1.4 Неперервний канал із завадами

Пропускна спроможність неперервного каналу із завадами визначається загальним співвідношенням (3.8), в якому  $R_{cp} = 2f_c$ , а кількість інформації визначиться шляхом граничного переходу для формули (2.22) при  $\Delta X \rightarrow 0$ :

$$I(Z/X) = - \int p(X) \log p(X) dX + \int p(Z) p(X/Z) \log p(X/Z) dXdZ = h(X) - h(X/Z). \quad (3.14)$$

З урахуванням сказаного, пропускна спроможність каналу:

$$C = 2f_c [h(X) - h(X/Z)]_{max}. \quad (3.15)$$

## 3.2 Приклади і задачі для самостійного розв'язання

**Задача 3.1.** Джерело інформації виробляє чотири значення сигналу  $x_1, x_2, x_3, x_4$  з апіорними ймовірностями  $P(x_1)=P(x_2)=0,3; P(x_3)=0,25; P(x_4)=0,15$  і тривалістю  $\tau_1=10^{-5}$  с,  $\tau_2=2 \cdot 10^{-5}$  с,  $\tau_3=4 \cdot 10^{-5}$  с,  $\tau_4=1,5 \cdot 10^{-5}$  с. Визначити швидкість створення інформації.

### Розв'язування

Середня ентропія джерела:

$$H(X) = - \sum_i P(x_i) \log P(x_i) = -2(0,3 \log 0,3) - 0,25 \log 0,25 - 0,15 \log 0,15 = 1,9527 \text{ біт.}$$

Середня тривалість сигналу

$$\tau_{cp} = \sum_i P(x_i) \tau_{x_i} = (0,3 + 0,3 \cdot 2 + 0,25 \cdot 4 + 0,15 \cdot 1,5) \cdot 10^{-5} = 2,125 \cdot 10^{-5} \text{ с.}$$

Швидкість створення інформації

$$R = \frac{H(X)}{\tau_{cp}} = \frac{1,9527}{2,125 \cdot 10^{-5}} = 91893 \text{ біт/с.}$$

**Задача 3.2.** Визначити швидкість створення інформації цифровим датчиком тиску LD 301, що має швидкодію 10 вимірів за секунду і чотирьохдекадний відліковий пристрій. Закон розподілу значень вимірюваної величини рівномірний.

### Розв'язування

Оскільки відліковий пристрій має 4 десяткові розряди, він може створювати  $n=10^4$  різних повідомлень. Ентропія таких повідомлень з урахуванням їх рівної ймовірності:

$$H(X) = \log n = \log 10^4 = 13,29 \text{ біт.}$$

Позначимо швидкодію приладу літерою  $S$ . Тоді час одного виміру

$$\tau = \frac{1}{S}.$$

Швидкість створення інформації

$$R = \frac{H(X)}{\tau} = S \quad H(X) = 10 \cdot 13,29 = 132,9 \text{ біт/с.}$$

**Задача 3.3.** У каналі передачі без завад використовується послідовний двійковий код з шістьма різними рівноймовірними символами. Тривалість всіх символів однакова і дорівнює  $10^{-6}$  с. Визначити пропускну спроможність каналу передачі інформації.

### Розв'язування

Пропускна здатність дискретного каналу без завад

$$C = \frac{\log n}{\tau_{cp}},$$

де  $n$  кількість можливих різних повідомлень. Для шестирозрядного двійкового коду  $n=2^6$ . Отже

$$C = \frac{\log 2^6}{10^{-6}} = 6 \cdot 10^6 \text{ біт/с.}$$

**Задача 3.4.** Канал передачі із завадами характеризується матрицею ймовірностей

$$\|P(x_i, z_j)\| = \begin{vmatrix} 0,1 & 0,2 & 0 \\ 0 & 0,3 & 0 \\ 0 & 0,2 & 0,2 \end{vmatrix}.$$

Визначити пропускну спроможність каналу передачі інформації, якщо тривалість  $\tau_{cp}$  всіх сигналів однакова і дорівнює  $10^{-4}$  с.

### Розв'язування

Додаючи ймовірності  $P(x_i, z_j)$  по рядках матриці ймовірностей, одержимо ймовірності  $P(x_i)$ :

$$P(x_1)=0,3; P(x_2)=0,3; P(x_3)=0,4.$$

Аналогічно сумуванням по стовпцям одержимо ймовірності  $P(z_j)$ :

$$P(z_1)=0,1; P(z_2)=0,7; P(z_3)=0,2.$$

Згідно формули сумісної ймовірності умовні ймовірності  $P(z_j/x_i)$  отримаємо розділивши  $P(x_i, z_j)$  на  $P(x_i)$ :

$$\|P(z_j / x_i)\| = \begin{vmatrix} 1/3 & 2/3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1/2 & 1 \end{vmatrix},$$

а ймовірності  $P(x_i/z_j)$  – розділивши  $P(x_i, z_j)$  на  $P(z_j)$ :

$$\|P(x_i / z_j)\| = \begin{vmatrix} 1 & 2/7 & 0 \\ 0 & 3/7 & 0 \\ 0 & 2/7 & 1 \end{vmatrix}.$$

Кількість інформації визначається формулою:

$$I(Z/X) = H(X) - H(X/Z).$$

Ентропія сигналу  $X$ :

$$H(X) = - \sum_i P(x_i) \log P(x_i) = -2(0,3 \log 0,3) - 0,4 \log 0,4 = 1,57 \text{ біт.}$$

З урахуванням того, що  $P(x_i/z_j) \log P(x_i/z_j) = 0$ , коли ймовірність дорівнює 0 або 1, знайдемо умовну ентропію  $H(X/Z)$ :

$$H(X/Z) = - \sum_j P(z_j) \sum_i P(x_i/z_j) \log P(x_i/z_j) = 0,7 - \frac{2}{7} \log \frac{2}{7} - \frac{3}{7} \log \frac{3}{7} - \frac{2}{3} \log \frac{2}{3} = 1,09 \text{ біт.}$$

Кількість інформації

$$I(Z/X) = 1,57 - 1,09 = 0,48 \text{ біт.}$$

Оскільки  $\tau_{cp} = 10^{-4}$  с, визначимо пропускну спроможність каналу:

$$C = \frac{1}{\tau_{cp}} I(Z, X) = \frac{1}{10^{-4}} 0,48 = 4800 \text{ біт/с.}$$

**Задача 3.5.** Передача одного байта інформації по послідовному каналу без завад займає 10 мкс. Визначити пропускну спроможність каналу передачі інформації.

**Задача 3.6.** Джерело інформації виробляє три повідомлення з ймовірностями  $P(x_1)=0,2$ ;  $P(x_2)=0,3$ ;  $P(x_3)=0,5$  та тривалістями  $\tau_1=1$  мкс,  $\tau_2=2$  мкс,  $\tau_3=3$  мкс.

Канал передачі з завадами характеризується матрицею перехідних ймовірностей:

$$\|P(z_j/x_i)\| = \begin{vmatrix} 0,2 & 0,2 & 0 \\ 0 & 0,3 & 0 \\ 0 & 0,1 & 0,2 \end{vmatrix}.$$

На виході каналу передачі маємо множину повідомлень  $\{z_j\}$  з ймовірностями  $P(z_1)=0,4$ ;  $P(z_2)=0,3$ ;  $P(z_3)=0,3$ .

Визначити пропускну спроможність каналу передачі інформації.

### Розв'язування

Кількість інформації на виході каналу визначається формулою (2.22):

$$I(Z/X) = H(X) - H(X/Z).$$

Ентропія сигналу  $X$

$$H(X) = - \sum_i P(x_i) \log P(x_i) = -0,2 \log 0,2 - 0,3 \log 0,3 - 0,5 \log 0,5 = 1,485 \text{ біт.}$$

Умовна ентропія  $H(X/Z)$

$$H(X/Z) = - \sum_j P(z_j) \sum_i P(x_i/z_j) \log P(x_i/z_j) =$$

$$= -0,4 \cdot 2 \cdot 0,2 \log 0,2 - 0,3 \cdot 0,3 \log 0,3 - 0,3(0,1 \log 0,1 + 0,2 \log 0,2) = 0,767 \text{ біт.}$$

Кількість інформації

$$I(Z/X) = 1,485 - 0,767 = 0,718 \text{ біт.}$$

Середня тривалість передачі повідомлення

$$\tau_{cp} = \sum_i P(x_i) \tau_{x_i} = 0,2 \cdot 1 + 0,3 \cdot 2 + 0,5 \cdot 3 = 2,3 \text{ мкс.}$$

Пропускна спроможність

$$C = \frac{1}{\tau_{cp}} I(Z, X) = \frac{1}{2,3 \cdot 10^{-6}} 0,718 = 312173 \text{ біт/с.}$$

**Задача 3.7.** Датчик виробляє інформацію зі швидкістю  $R_{cp} = 150$  біт/с, що передається через канал передачі, який може передавати за одиницю часу  $N = 80$  двійкових знаків. Ймовірність нуля та одиниці однакова, ймовірність помилки  $Q = 0,15$ . З'ясувати, чи достатня пропускна спроможність каналу для передачі інформації від джерела.

### Розв'язування

Кількість інформації у двійковому сигналі визначається формулою (3.10):

$$I(Z/X) = 1 + Q \log Q + (1 - Q) \log(1 - Q) = 1 + 0,15 \log 0,15 + (1 - 0,15) \log(1 - 0,15) = 0,3903 \text{ біт.}$$

Час, що витрачається на передачу одного двійкового знака:

$$\tau_{cp} = \frac{1}{80} \text{ с.}$$

Пропускна спроможність каналу:

$$C = \frac{1}{\tau_{cp}} I(Z, X) = 80 \cdot 0,3903 = 31,2 \text{ біт/с.}$$

Це недостатньо для передачі інформації, що створюється зі швидкістю 150 біт/с.

**Задача 3.8.** Керування виконавчим механізмом здійснюється сигналом з широтно-імпульсною модуляцією. Необхідна ширина імпульсу змінюється від 1 мс до 1024 мс і формується з допомогою генератора опорної частоти  $f_{\tau} = 1$  кГц.

Визначити необхідну пропускну спроможність каналу передачі такого сигналу.

### Розв'язування

Оскільки канал передачі має передавати модульовані сигнали, будемо вважати його неперервним і використовувати для розрахунку пропускної спроможності п. 3.1.3.

У відповідності до задачі 1.3 практична ширина спектру при урахуванні 90% енергії імпульсу становить:

$$\omega = 2\pi f_c = \frac{\pi}{\tau},$$

де  $\tau$  – тривалість імпульсу. Необхідно враховувати крайній випадок  $\tau = 1$  мс, що відповідає максимальній ширині спектру:

$$f_c = \frac{1}{2\tau} = \frac{1}{2 \cdot 10^{-3}} = 500 \text{ Гц.}$$

Ширина імпульсів формується з дискретністю  $\Delta\tau = \frac{1}{f_T} = 10^{-3}$  с.

Кількість інформації:

$$I_{\max} = \log\left(\frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{\Delta\tau} + 1\right) = \log\left(\frac{1024 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}} + 1\right) = 10 \text{ біт.}$$

Необхідна пропускна спроможність каналу:

$$C = 2 f_c I_{\max} = 2 \cdot 500 \cdot 10 = 10000 \text{ біт/с.}$$

**Задача 3.9.** Датчик виробляє сигнал з шириною спектру  $f$  (див. табл. 3.1), який направляється через канал передачі з пропускнуою спроможністю  $C$  до контролера, де подається на  $n$ -розрядний АЦП. Визначити, чи достатня пропускна спроможність каналу, якщо завади незначні.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для задачі 3.9

<b>Варіант</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
Ширина спектру $f$ , Гц	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Розрядність АЦП $n$	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Пропускна спроможність, Кбіт/с	1	5	2	1	1	5	2,4	5	5	10
<b>Варіант</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
Ширина спектру $f$ , Гц	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Розрядність АЦП $n$	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Пропускна спроможність, Кбіт/с	1	5	2	5	5	10	12	5	16	5
<b>Варіант</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>
Ширина спектру $f$ , Гц	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Розрядність АЦП $n$	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
Пропускна спроможність, Кбіт/с	5	5	2	5	5	12	2,4	5	20	5

**Задача 3.10.** Датчик, призначений для вимірювання рівномірно розподіленої величини, має швидкодію  $k$  вимірів за секунду і виробляє  $m$ -розрядний двійковий код. Визначити, чи можна використати для передачі цього коду в центральний комп'ютер послідовний інтерфейс, який може передавати за секунду  $N$  біт. Ймовірність нуля та одиниці однакові, ймовірність помилки передачі  $Q$  (див. табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Вихідні дані для задачі 3.10

<b>Варіант</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
Розрядність $m$	8	12	16	18	24	8	12	16	18	24
Швидкодія $k$	10000	1000	100	10	10	200	1000	200	200	20
Швидкість $N$ , Кбіт/с	100	10	10	1	1	5	100	100	10	1
Ймовірність помилки $Q$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,25	0,2	0,15
<b>Варіант</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
Розрядність $m$	8	12	16	18	24	8	12	16	18	24
Швидкодія $k$	5000	500	50	100	25	100	250	500	50	50
Швидкість $N$ , Кбіт/с	100	10	10	2	5	2	100	50	12	25
Ймовірність помилки $Q$	0,12	0,11	0,2	0,1	0,25	0,15	0,12	0,2	0,2	0,15
<b>Варіант</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>
Розрядність $m$	16	16	12	12	24	14	8	8	18	18
Швидкодія $k$	5000	500	50	100	50	100	250	500	500	50
Швидкість $N$ , Кбіт/с	200	10	5	2	5	2	100	50	24	8
Ймовірність помилки $Q$	0,12	0,12	0,2	0,15	0,18	0,1	0,12	0,2	0,2	0,15

### 3.3 Запитання для самоконтролю

1. Що розуміється під швидкістю передачі інформації та пропускнуою спроможністю каналу передачі?
2. Дайте характеристику каналу передачі з завадами і без завад.
3. Якими характеристиками визначаються сигнал і канал передачі?
4. Чим викликана необхідність узгодження джерела сигналу і каналу передачі?

## 4 КОДУВАННЯ СИГНАЛІВ

### 4.1 Теоретичні відомості і розрахункові співвідношення

Процес представлення інформації у вигляді кодів є суттю процесу кодування. При кодуванні змінюється структура символів, якими представляється інформація на вході і виході кодувального пристрою (КП), але не повинна змінюватись кількість інформації, яка міститься у кодах.

Якщо треба закодувати  $N$  різних повідомлень двійковим кодом, то довжина такого коду визначається виразом

$$n \geq \lceil \log_2 N \rceil, \quad (4.1)$$

де символами  $\lceil \rceil$  означена операція округлення до більшого цілого числа. Звідси потужність кодувальної множини  $N$  можна виразити так:

$$N \leq 2^n. \quad (4.2)$$

При простому кодуванні будь-якому елементу  $x_i$  початкової інформації відповідає одна конкретна кодова комбінація з множини вихідних кодів.

Для побудови простого кодувального пристрою можна використати шифратор без пам'яті, входами якого є елементи повідомлень, а виходами – розряди двійкового коду. На виході каналу передачі треба мати дешифратор, що працює за алгоритмом, зворотним до алгоритму шифратора (рис. 4.1).

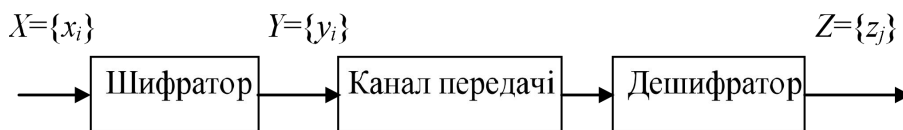


Рис. 4.1

В ході передачі інформації по каналу зв'язку внаслідок дії завад коди можуть бути спотворені. Для характеристики ступеня відповідності прийнятої інформації переданій вводять поняття завадостійкості. Під завадостійкістю розуміють або здатність системи протистояти шкідливій дії завад, або здатність відновлювати спотворену інформацію із заданою достовірністю. Щоб мати можливість відновлення інформації, застосовують відповідне завадостійке кодування.

Теорія завадостійкого кодування базується на наступній теоремі Шеннона: для будь-якої швидкості інформації, меншої, ніж пропускна спроможність каналу передачі, існує код, при використанні якого ймовірність помилкового декодування буде скільки завгодно мала.

Завадостійкі коди дозволяють виявляти і усувати помилки, викликані завадами.

Число спотворених символів у  $n$ -розрядній кодовій комбінації називається кратністю помилки. Число помилок  $i$ -ї кратності дорівнює числу сполучень  $C_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!}$ . Загальне число помилок:

$$E = \sum_{i=1}^g C_n^i, \quad (4.3)$$

де  $g$  – урахована кратність помилок.

При взаємно-незалежних помилках ймовірність спотворення  $i$  символів у  $n$ -розрядній кодовій комбінації така:

$$P_i = C_n^i p_e^i (1 - p_e)^{n-i}, \quad (4.4)$$

де  $p_e$  – ймовірність створення одного символу комбінації. Загальна ймовірність помилки з урахуванням помилок однократних, двократних і т.д. до  $g$ -кратних:

$$P_{\text{пом}} = \sum_{i=1}^g C_n^i p_e^i (1 - p_e)^{n-i}, \quad (4.5)$$

При побудові завадостійкого коду задаються числом  $N$  елементів інформації, які треба закодувати, та кратністю  $g$  помилок, які треба виявити. Кількість інформаційних розрядів коду:

$$k = \lceil \log M \rceil. \quad (4.6)$$

Для отримання завадостійкого коду до інформаційних розрядів додаються  $m$  надмірних розрядів, кількість яких залежить від загального числа можливих помилок:

$$m = \log(1 + E). \quad (4.7)$$

Загальна довжина коду:

$$n = k + m. \quad (4.8)$$

Для виявлення однократних помилок застосовують контроль парності. Для цього в код додається один надмірний розряд, який називається контрольним. Значення цього розряду визначається як сума за модулем 2 всіх інформаційних розрядів. Якщо інформаційна частина коду має парне число двійкових одиниць, то в контрольному розряді буде нуль, у випадку непарного числа одиниць в інформаційних розрядах у контрольному розряді є одиниця, тобто загальне число одиниць у коді завжди парне. На приймальній стороні каналу передачі. перевіряється кількість одиниць у прийнятому коді. Якщо число одиниць непарне, то має місце помилка.

Можливий, як протилежний варіант, контроль непарності, коли у коді, що передається, число одиниць завжди непарне.

Коди з контролем парності (непарності) дозволяють виявити помилки непарної кратності. Ймовірність виявлення спотворених кодів

$$P_{\text{в.п.}} = \sum_{i=1,3,5,\dots}^n C_n^i p_e^i (1 - p_e)^{n-i}, \quad (4.9)$$

а ймовірність невиявлених помилок

$$P_{\text{н.п.}} = \sum_{i=2,4,6,\dots}^n C_n^i p_e^i (1-p_e)^{n-i}. \quad (4.10)$$

Наступний варіант завадостійкого коду – код з подвоєнням елементів, коли кожний розряд вхідної комбінації доповнюється додатковим розрядом, значення якого є інверсним по відношенню до початкового значення. Наприклад, вхідна кодова комбінація 101 представляється кодом 100110. Загальна довжина такого коду  $n = 2k$ .

Код з подвоєнням елементів виявляє всі помилки, за винятком кратних помилок у парних розрядах. Ймовірність невиявлених помилок

$$P_{\text{н.п.}} = \sum_{i=1}^k C_k^i p_e^{2i} (1-p_e)^{n-2i}. \quad (4.11)$$

Ще один варіант – інверсні коди, які будуються за наступним алгоритмом:

а) визначається парність (чи непарність) кількості одиниць у інформативній частині коду;

б) до інформативної частини додається повторення її в прямому коді, якщо кількість одиниць парна, або в інверсному коді, якщо кількість одиниць непарна.

Наприклад, маємо закодувати дві комбінації: 0011 та 1101. Перша комбінація має парну кількість одиниць, тож додаємо до неї таку ж комбінацію. Результуючий код 00110011. У другій комбінації непарне число одиниць, для неї треба додати її інверсний код: 11010010.

Як і у випадку коду з подвоєнням елементів число надмірних розрядів дорівнює числу розрядів первинного коду (до кодування). Інверсне кодування дозволяє виявити практично всі помилки, за винятком тих випадків, коли одночасно спотворюються 4, 8 і т.д. елементів, наприклад, два в первинному коді і два в надмірних розрядах. Звідси ймовірність невиявлених помилок:

$$P_{\text{н.п.}} = \sum_{i=4,8,\dots}^n C_n^i p_e^i (1-p_e)^{n-i}. \quad (4.12)$$

*Ефективність інформаційної системи* – це здатність її забезпечувати передачу, приймання, обробку, перетворення і подання інформації найекономічнішим способом. Одним із найважливіших критеріїв оцінки ефективності інформаційної системи є швидкість передачі інформації:

$$v = \frac{I}{T}, \quad (4.13)$$

де  $I$  – кількість інформації, що передається за час  $T$ .

Для порівняльної оцінки ефективності різних систем використовується критерій питомої швидкості передачі інформації:

$$R_n = \frac{v}{F} = \frac{I}{FT}, \quad (4.14)$$

де  $F$  – смуга частот сигналу.

## 4.2 Приклади і задачі для самостійного розв'язання

**Задача 4.1.** Закодувати шість елементів повідомлень двійковими простими кодами.

### Розв'язування

Довжина коду згідно (4.1):

$$n \geq \lceil \log_2 N \rceil = \lceil \log_2 6 \rceil = 3.$$

Потужність кодувальної множини

$$N = 2^n = 2^3 = 8.$$

Це кодові комбінації 000, 001, ..., 111. Кожному елементу інформації від першого до шостого можна поставити у відповідність одну з цих кодових комбінацій. Кодова комбінація 000 у кодуванні участі не бере, бо вона відповідає відсутності повідомлень. Можливі варіанти кодування представимо у табличному вигляді (табл. 4.1)

Табл. 4.1 – Результати кодування для задачі 4.1

Елементи інформації	Кодові комбінації	
	Варіант 1	Варіант 2
Перший	001	101
Другий	010	100
Третій	011	110
Четвертий	100	001
П'ятий	101	111
Шостий	110	011

**Задача 4.2.** Визначити ймовірність однократних, двократних і трикратних помилок у кодовій 5-розрядній комбінації, якщо ймовірність спотворення одного символу комбінації  $p_e = 0,001$ .

### Розв'язування

$$P_1 = C_n^1 p_e^1 (1 - p_e)^{n-1} = C_5^1 0,001 (1 - 0,001)^4 = 49,81 \cdot 10^{-4};$$

$$P_2 = C_5^2 0,001^2 (1 - 0,001)^3 = 0,097 \cdot 10^{-4};$$

$$P_3 = C_5^3 0,001^3 (1 - 0,001)^2 = 9,681 \cdot 10^{-9};$$

$$P_{\text{пом}} = P_1 + P_2 + P_3 = 49,9 \cdot 10^{-4}.$$

**Задача 4.3.** Закодувати шість елементів інформації кодами з контролем парності.

### Розв'язування

Кількість інформаційних розрядів згідно (4.6)

$$k = \lceil \log N \rceil = \lceil \log 6 \rceil = 3.$$

Загальна кількість розрядів коду з контролем парності

$$n = k+1.$$

Результати кодування запишемо у таблицю 4.2.

Табл. 4.2 – Результати кодування для задачі 4.3

Елементи інформації	Код	
	Інформаційні розряди	Контрольний розряд
Перший	001	1
Другий	010	1
Третій	011	0
Четвертий	100	1
П'ятий	101	0
Шостий	110	0

**Задача 4.4.** Закодувати 10 елементів інформації інверсними кодами.

**Задача 4.5.** Порівняти ймовірності невиявлення кодів з контролем парності і з подвоєнням елементів, якщо треба закодувати 18 елементів інформації, а ймовірність спотворення одного розряду дорівнює 0,001.

### Розв'язування

Число інформаційних розрядів:

$$k = \lceil \log N \rceil = \lceil \log 18 \rceil = 5.$$

Для коду з контролем парності довжина коду  $n = k+1=6$ . Для коду з подвоєнням елементів  $n = 2k = 10$ .

Ймовірність невиявлення кодів з контролем парності:

$$P_{н.п.} = \sum_{i=2,4,6,\dots}^n C_n^i p_e^i (1-p_e)^{n-i} = \sum_{i=2,4,6,\dots}^6 C_6^i p_e^i (1-p_e)^{6-i} = 1,5 \cdot 10^{-5}.$$

Ймовірність невиявлення кодів з подвоєнням елементів:

$$P_{н.п.} = \sum_{i=1,2,3,\dots}^k C_k^i p_e^{2i} (1-p_e)^{n-2i} = \sum_{i=1}^5 C_k^i 10^{-3 \cdot 2i} (1-10^{-3})^{10-2i} = 0,5 \cdot 10^{-5}.$$

Таким чином, завадостійкість коду з подвоєнням елементів вище завадостійкості кодів з контролем парності.

**Задача 4.6.** Оцінити ефективність передачі інформації за допомогою двійкових сигналів, якщо їх тривалість  $\tau=0,001$  с, ймовірності нуля та одиниці однакові, а ймовірність спотворення  $Q=5 \cdot 10^{-4}$ .

### Розв'язування

Оцінимо ефективність передачі інформації згідно (4.13) і (4.14). Як було визначено в п. 3.1.2, кількість інформації, що передається з одним бітом двійкового коду, визначається виразом

$$I = H(X) - H(X/Z) = 1 + Q \log Q + (1-Q) \log(1-Q) = 0,9938 \text{ біт.}$$

Ефективність передачі інформації

$$v = \frac{I}{\tau} = \frac{0.9938}{0.001} = 993,8 \text{ біт/с.}$$

Якщо передача здійснюється за допомогою одиничних прямокутних імпульсів, то  $\tau=1/F$  і питома швидкість передачі інформації

$$R = \frac{v}{F} = \tau v = 0.001 \cdot 993.8 = 0.9938 .$$

**Задача 4.7.** Оцінити ефективність передачі інформації за допомогою інверсного коду, якщо число інформаційних розрядів  $k=5$ , ймовірність спотворення розряду  $Q=0,01$ , тривалість його передачі  $\tau=0,001$  с, кількість елементів інформації  $N=27$ .

### Розв'язування

Кількість інформації:

$$I = H(X) - H(X/Z).$$

При допущенні однакової ймовірності появи елементів інформації апіорна ентропія:

$$H(X) = \log N = \log 27 = 4,755 \text{ біт.}$$

Ентропія після одержання повідомлення:

$$H(X/Z) = P_{н.п.} \log P_{н.п.} + (1 - P_{н.п.}) \log (1 - P_{н.п.}),$$

де  $P_{н.п.}$  – ймовірність невиявлених помилок для інверсного коду:

$$P_{н.п.} = \sum_{i=1}^k C_k^i p_e^{2i} (1 - p_e)^{n-2i} .$$

Тут  $n=2k$  – кількість елементів інверсного коду;  $p_e$  – ймовірність спотворення одного розряду кодової комбінації, що в нашому випадку є рівним  $Q$ . Звідси:

$$P_{н.п.} = \sum_{i=1}^5 \frac{5!}{i!(5-i)!} 10^{-8i} (1 - 10^{-8i})^{10-2i} = 0,0005.$$

Таким чином:

$$H(X/Z) = 0,0005 \log 0,0005 + (1 - 0,0005) \log (1 - 0,0005) = 0,0057 \text{ біт.}$$

Ефективність передачі інформації

$$v = \frac{I}{2k\tau} = \frac{4,755 + 0,0057}{2 \cdot 5 \cdot 10^{-3}} = 47607 \text{ біт/с.}$$

**Задача 4.8.** Оцінити ефективність передачі інформації за допомогою імпульсів, якщо їх тривалість  $\tau$ , а ймовірність спотворення  $P_e$ . (див. табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Вихідні дані до задачі 4.8

Параметр	Остання цифра шифру									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\tau, c$	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009	0,002
Параметр	Передостання цифра шифру									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_e$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$

### 4.3 Запитання для самоконтролю

1. Що таке кодування сигналу?
2. Як визначається довжина простого коду?
3. У чому суть завадостійкого кодування?
4. Як визначається довжина завадостійкого коду?
5. Як будуються коди з можливістю виявлення помилок?
6. Порівняйте достоїнства і недоліки різних варіантів кодування.

## 5 ПРОЕКТНИЙ РОЗРАХУНОК КЕРУЮЧИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ЗАСОБІВ

### 5.1 Розрахунки розрядності та дискретності АЦП та ЦАП

Сигнали від більшості датчиків вводяться в керуючий обчислювальний засіб (КОЗ) через аналого-цифровий перетворювач.

Похибку АЦП вважають випадковою величиною, рівномірно розподіленою в інтервалі  $[-q/2, q/2]$ , де  $q = y_{\max}/2^n$  – ціна молодшого розряду  $n$ -розрядного коду на виході АЦП. Тоді с.к.в. похибки квантування:

$$\sigma_{\text{АЦП}} = \frac{q}{2\sqrt{3}} = \frac{y_{\max}}{2^n \cdot 2\sqrt{3}}. \quad (5.1)$$

Розрядність АЦП вибирають так, щоб с.к.в. похибки квантування не перевищувало с.к.в. похибки вимірювального засобу (датчика)  $\sigma$ :

$$\sigma_{\text{АЦП}} \leq \rho \sigma, \quad (5.2)$$

де  $\rho = 0,3 \dots 0,5$ . Об'єднавши (5.1) та (5.2), отримаємо формулу розрахунку числа розрядів АЦП:

$$\frac{y_{\max}}{2^{n+1} \sqrt{3}} = \rho \sigma;$$

$$n = \log_2 \frac{y_{\max}}{\rho \sigma 2\sqrt{3}}. \quad (5.3)$$

Якщо сигнал від датчика входить у склад контуру регулювання, треба враховувати вплив розрядності АЦП на точність вироблення керуючої дії. Для забезпечення заданої помилки управління  $\varepsilon$  необхідно, щоб похибка завдання  $\Delta g$  і похибка вимірювання регульованої величини  $\Delta u$  були значно меншими за

допустиму помилку управління:  $\Delta y \ll \varepsilon_d$  та  $\Delta g \ll \varepsilon_d$ . На практиці звичайно приймають:

$$\Delta y \approx 0,1\varepsilon_d. \quad (5.4)$$

Оскільки помилка сигналу зворотного зв'язку складається з похибки датчика і похибки АЦП, то дисперсія цієї помилки:

$$\sigma_y^2 = \sigma^2 + \sigma_{\text{АЦП}}^2 (1 + \rho^2)\sigma^2. \quad (5.5)$$

Будемо вважати, що  $\Delta y$  розподілена за нормальним законом. Тоді, згідно правилу «трьох сигм», її максимальне значення приблизно дорівнює  $3\sigma_y$ . Аналогічно помилка управління  $\varepsilon_d \approx 3\sigma_d$ . Тоді, з урахуванням (5.1) та (5.4) маємо:

$$0,1\varepsilon_d = 3\sigma\sqrt{1 + \rho^2}; \quad 0,1\sigma_d = \sigma\sqrt{1 + \rho^2}; \quad \sigma = \frac{0,1\sigma_d}{\sqrt{1 + \rho^2}}.$$

Якщо врахувати (5.3) та (5.2), отримаємо формулу розрахунку числа розрядів АЦП через задане значення с.к.в. помилки управління:

$$\frac{y_{\max}}{2^{n+1}\rho\sqrt{3}} = \frac{0,1\sigma_d}{\sqrt{1 + \rho^2}};$$

$$n = \log_2 \frac{y_{\max}\sqrt{1 + \rho^2}}{0,34\rho\sigma_d}. \quad (5.6)$$

Похибка керуючої дії  $\Delta u$  складається з похибки розрахунку  $\Delta u_p$  та похибки перетворення цифрового коду в аналоговий сигнал  $\Delta u_{\text{цап}}$ . Ці похибки можна розглядати як взаємонезалежні, тоді  $\Delta u = \Delta u_p + \Delta u_{\text{цап}}$ . Оскільки похибка розрахунку утворюється під впливом багатьох випадкових факторів, можна вважати її розподіленою за нормальним законом з дисперсією  $\sigma_p$ .

Похибку ЦАП вважають випадковою величиною, рівномірно розподіленою в інтервалі  $[-\Delta u_{\text{цап}}, +\Delta u_{\text{цап}}]$ . С.к.в. такої похибки:

$$\sigma_{\text{цап}} = \frac{\Delta u_{\text{цап}}}{\sqrt{3}}. \quad (5.7)$$

Дисперсія керуючої дії:

$$\sigma_u^2 = \sigma_p^2 + \sigma_{\text{цап}}^2. \quad (5.8)$$

Похибка  $\Delta u_{\text{цап}}$  не повинна перевищувати похибки розрахунку:

$$\Delta u_{\text{цап}} = \beta \Delta u_p = \beta (3\sigma_p), \quad \beta < 1.$$

Тоді, з урахуванням (5.8):

$$\sigma_u^2 = \frac{\Delta u_{\text{цап}}^2}{3\beta} + \sigma_{\text{цап}}^2;$$

$$\sigma_{\text{цап}} = \frac{3\beta\sigma_u}{\sqrt{1 + 3\beta^2}}. \quad (5.9)$$

Враховуючи, що  $\Delta u_{\text{цап}} = 0,5q_{\text{цап}} = 0,5u_{\text{max}}/2^n$  ( $u_{\text{max}}$  – максимальне значення аналогового сигналу на виході ЦАП,  $n$  – розрядність двійкового коду), з (5.7) отримаємо:

$$\frac{u_{\text{max}}}{2^{n+1}} = \frac{3\beta\sigma_u}{\sqrt{1+3\beta^2}}\sqrt{3};$$

$$n = \log_2 \frac{y_{\text{max}}\sqrt{1+3\beta^2}}{\sigma_u\beta 3\sqrt{3}} - 1 = \log_2 \frac{y_{\text{max}}\sqrt{0,33+\beta^2}}{3\sigma_u\beta} - 1. \quad (5.10)$$

Аналогічним шляхом з (5.8) можна знайти допустиму похибку розрахунку:

$$\sigma_u^2 = \sigma_p^2 + 3\beta^2\Delta_{\text{цап}};$$

$$\sigma_p = \frac{\sigma_u}{\sqrt{1+3\beta^2}};$$

$$\Delta u_p = 3\sigma_p = \frac{3\sigma_u}{\sqrt{1+3\beta^2}} = \frac{\Delta_u}{\sqrt{1+3\beta^2}}. \quad (5.10)$$

## 5.2 Проектування керуючих обчислювальних засобів

Важливим елементом проектування КІСУ є розробка чи вибір КОЗ за спеціальною методикою, що передбачає:

- а) вибір формату даних;
- б) визначення довжини розрядної сітки;
- в) вибір мови програмування;
- г) оцінку необхідної швидкодії;
- д) оцінку необхідної ємності пам'яті.

Ці характеристики визначаються особливостями алгоритмів прикладних задач, які мають вирішуватись за допомогою КОЗ. Аналізуючи ці алгоритми, визначають діапазон зміни вихідних даних і результатів обчислень. Малий діапазон дозволяє представляти числа у форматі з фіксованою комою, великий діапазон вимагає використання формату з плаваючою комою.

Довжина розрядної сітки КОЗ визначається кількістю розрядів, що використовуються для подання даних. Необхідно визначити розрядність вхідного та вихідного регістрів, в яких зберігаються вхідні дані та результати розрахунків, а також розрядність цифрового процесора (ЦП).

При розрахунку довжини розрядної сітки для КОЗ з фіксованою комою виходять з припущення, що задача сформульована у вигляді  $Y = \Phi(X)$ , де  $X$  та  $Y$  – вхідний та вихідний сигнали,  $\Phi$  – функція перетворення.

Максимальне значення чисел у ЦП з фіксованою комою визначається виразом

$$N_{\text{max}} = 1 - 2^{-n}, \quad (5.11)$$

де  $n$  – кількість розрядів мантиси числа.

Припустимо, що реальній змінній  $Z$  відповідає машинна змінна  $\tilde{Z}$ , модуль якої не повинен перевищувати значення, заданого (5.11). Зв'язок між реальною і машинною змінною виразимо як масштабний коефіцієнт  $M_Z$ . Таким чином:  $Z = M_Z \tilde{Z}$ . Значення масштабу визначається з нерівності:

$$M_Z = \frac{|Z|_{\max}}{|\tilde{Z}|_{\max}}, \quad (5.12)$$

Значення масштабу зручно вибирати як цілий степінь двійки:

$$M_Z = 2^{P_Z}. \quad (5.13)$$

При цьому значення степеня повинно відповідати умові

$$P_Z = \text{int}[\log_2 |Z|_{\max}] + 1. \quad (5.14)$$

Максимальне значення результатів обчислень визначається межами зміни вхідних сигналів та видом функції  $\Phi(X)$ .

Розрядність вхідного регістра, необхідну для зберігання значення вхідного сигналу, можна обчислити так:

$$R_X^* = \text{int}[\log_2 |X|_{\max}] - \text{int}[\log_2 \delta_X] + 1, \quad (5.15)$$

де  $\delta_X$  – с.к.в. помилки визначення вхідного сигналу.

Після масштабування вхідного сигналу перед першою значущою цифрою можуть мати місце нулі. Їх кількість

$$R_X^0 = P_X - \{\text{int}[\log_2 |X|_{\max}] + 1\}, \quad (5.16)$$

де  $P_X$  розраховується згідно (5.4). Тоді розрядність вхідного регістра

$$R_X = R_X^0 + R_X^*. \quad (5.17)$$

Розрядність вихідного регістра обчислюється аналогічно.

Довжина розрядної сітки ЦП повинна бути не меншою ніж розрядність вхідного регістру плюс додаткові розряди для компенсації погрешностей розрахунку. Позначимо через  $T$  ціну молодшого розряду подання вхідного сигналу. Тоді різниця числа двійкових позицій між розрядом з ціною  $T$  та розрядом, що містить у собі не більше с.к.в. допустимої інструментальної похибки  $\sigma_{\text{доп}}$  і не менше половини цього значення:

$$G = \text{int}[\log_2 \delta_{\text{доп}}] - \text{int}[\log_2 T] + 1. \quad (5.18)$$

Допустиме значення інструментальної похибки у розмірності вихідного сигналу розрахуємо так:

$$\sigma_{\text{доп}} = \sqrt{\sigma_{\text{доп}}^2 - \sigma_X^2 - \sigma_T^2}, \quad (5.19)$$

де

$$\sigma_T = \sqrt{\left| \sigma_X \frac{d\Phi(X)}{dX} \right|_{\max}^2}. \quad (5.20)$$

Якщо позначити  $R_\sigma = R_X + R_Y$ , то, з урахуванням попередніх формул, (5.8) набуде вигляду:

$$G = \text{int}[\log_2 \delta_{\text{доп}}] - \text{int}[\log_2 \delta_{\text{доп}}] + R_\sigma. \quad (5.21)$$

Для компенсації помилок округлення в ході розрахунку функції  $\Phi(X)$  необхідні додаткові розряди ЦП у кількості

$$S = \text{int}[\log_2 \sigma_{\text{окр}}] + 1, \quad (5.22)$$

де  $\sigma_{\text{окр}} = \sqrt{N/12}$  – с.к.в. помилки округлення,  $N$  – кількість операцій в ітераційному процесі обчислення функції  $\Phi(X)$ .

Загальне число розрядів ЦП

$$R_{\text{ЦП}} = R_X + S', \quad (5.23)$$

де

$$S' = \begin{cases} S - G, & \text{якщо } S - G > 0; \\ 0, & \text{якщо } S - G \leq 0. \end{cases} \quad (5.24)$$

Задача оптимального вибору періоду дискретизації  $T_0$  стосується однієї з основних проблем оптимальної витрати машинного часу КОЗ. При зменшенні  $T_0$  підвищується точність регулювання, але машинний час витрачається нерационально. Необхідне компромісне рішення.

Вибір  $T_0$  здійснюється на основі теореми Котельникова, згідно якої функція  $y(t)$  зі спектром, обмеженим частотою  $\omega_z$ , повністю визначається своїми значеннями в моменти часу  $nT_0$ , проміжки між якими

$$T_0 = \frac{\pi}{\omega_z},$$

тобто частота дискретизації вибирається з умови  $\omega_0 \geq 2\omega_z$ . Тому необхідно оцінити значення максимальної частоти у спектрі керованої змінної  $Y(j\omega)$ .

Прийmemo, що на регулятор подається завдання у вигляді синусоїдального сигналу з амплітудою, рівною одиниці:  $|G(j\omega)|=1$ . Тоді для контура, що включає об'єкт з частотною передатною функцією  $W_o(j\omega)$  і регулятор  $W_p(j\omega)$  можна записати:

$$\left| \frac{W_p(j\omega) W_o(j\omega)}{1 + W_p(j\omega) W_o(j\omega)} \right| = \varepsilon, \quad (5.25)$$

де  $\varepsilon = 0,01 \dots 0,05$  – величина, що характеризує точність регулювання. Розв'язуючи рівняння (5.25) відносно частоти, знайдемо  $\omega_z$  і далі, за теоремою Котельникова,  $T_0$ .

Рівняння (5.25) зручно розв'язувати у пакеті MatLab. Для цього використовується функція `fzero('equation1',1)`, де 'equation1' – ім'я файла-функції (Function M-file), в якому виконується розрахунок виразу

$$y = \left| \frac{W_p(j\omega) W_o(j\omega)}{1 + W_p(j\omega) W_o(j\omega)} \right| - \varepsilon$$

## 5.2 Первинна обробка даних в контролерах

Найбільш поширені наступні операції первинної обробки даних:

- а) цифрова лінеаризація характеристики вимірювального каналу в цілому;
- б) цифрова корекція систематичних похибок, обумовлених дрейфами і впливовими чинниками;
- в) цифрова фільтрація з метою зменшення випадкових погрішностей, викликаних завадами і внутрішніми шумами каналу;
- г) відкидання недостовірних відліків і відновлення пропущених даних.

Лінеаризація – операція отримання лінійної (із заданою мірою точності) загальної характеристики перетворення вимірювального каналу, в який входять ланки з нелінійними характеристиками.

При *табличній* лінеаризації всі можливі кодові комбінації АЦП служать адресами в таблиці, з якої вибираються лінеаризовані дані. Для чисто *обчислювальної* лінеаризації має бути знайдена формула, що описує залежність значень сигналу  $X_{\text{лін}}$  від коду АЦП  $X_{\text{АЦП}}$  у всьому діапазоні вимірюваних величин. У випадках слабкої нелінійності таку формулу можна представити поліномом невисокого порядку.

При сильній нелінійності більш універсальною виявляється *шматкова* лінеаризація, при якій необхідна залежність  $X_{\text{лін}}$  від  $X_{\text{АЦП}}$  розбивається на ділянки, і на всіх ділянках описується однією і тією ж простою формулою, але зі своїми коефіцієнтами для кожної ділянки.

Важливим питанням при організації первинної цифрової обробки виявляється *послідовність виконуваних операцій*. Наприклад, хай канал має параболічну характеристику:

$$N_{\text{АЦП}} = ax + bx^2, \quad (5.26)$$

а миттєвий вхідний сигнал датчика описується вираженням:

$$x(t) = x_s + x_n(t), \quad (5.27)$$

де  $x_s$  – постійна в часі корисна складова сигналу,  $x_n(t)$  – періодична або випадкова завада з нульовим середнім значенням. Математичне очікування усередненого відліку запишеться як

$$\bar{N}_{\text{АЦП}} = ax_s + a\bar{x}_n + bx_s^2 + 2bx_s\bar{x}_n + bD(x_n), \quad (5.28)$$

де риска зверху позначає математичне очікування, рівне нулю для завади, а  $D(x_n)$  - математичне очікування квадрата завади, тобто її дисперсія або, для періодичної завади, квадрат значення, що діє. Залишивши тільки члени, не рівні нулю, отримаємо:

$$\bar{N}_{\text{АЦП}} = ax_s + bx_s^2 + bD(x_n). \quad (5.29)$$

Звідси видно, що до корисного результату  $ax_s + bx_s^2$  додалася систематична похибка, пропорційна дисперсії (або квадрату діючого значення) завади. Параметри останньої, як правило, точно не відомі. Ця похибка, дещо трансформувавшись, залишиться і після лінеаризації. У подібних випадках рекомендується спочатку виконувати лінеаризацію кожного відліку, а потім вже усереднювання або фільтрацію.

Інакше йде справа у разі, коли завада (наприклад, електричні наведення) вноситься на ділянці каналу *після* нелінійного датчика. В цьому випадку порядок операцій має бути іншим: спочатку фільтрація, а потім лінеаризація.

Одним з найбільш простих способів фільтрації є усереднювання (або просто підсумовування – відмінність між ними лише в постійному коефіцієнті) декількох послідовних відліків.

Фільтрація методом експонентного згладжування здійснюється відповідно до формули

$$y_k = x_k + K_{\text{exp}}(x_k - x_{k-1}), \quad (5.30)$$

де  $K_{\text{exp}}$  – коефіцієнт експонентного згладжування,  $x_k$  та  $x_{k-1}$  – поточний та попередній відліки вхідного сигналу.

### 5.3 Приклади і задачі для самостійного розв'язання

**Задача 5.1.** Визначити кількість розрядів вхідного регістра ЦП з фіксованою комою, якщо вхідний сигнал змінюється в межах  $-10 < X < 10$ , с.к.в. помилки визначення вхідного сигналу  $\delta_X = 5 \cdot 10^{-4}$ .

#### Розв'язування

Максимальне значення вхідного сигналу 10. Максимальне значення машинної змінної у випадку формату з фіксованою комою 1.

Масштаб вхідного сигналу:

$$M_X = 2^{P_X} \cdot 10.$$

Відповідний степінь двійки:

$$P_X = \text{int}[\log_2 |X|_{\max}] + 1 = \text{int}[\log_2 10] + 1 = 4.$$

Визначаємо складові  $R_X^*$  та  $R_X^0$ :

$$R_X^* = \text{int}[\log_2 |X|_{\max}] - \text{int}[\log_2 \delta_X] + 1 = \text{int}[\log_2 10] - \text{int}[\log_2 5 \cdot 10^{-4}] + 1 = 14.$$

$$R_X^0 = P_X - \text{int}[\log_2 |X|_{\max}] - 1 = 4 - \text{int}[\log_2 10] - 1 = 0.$$

Кількість розрядів вхідного регістра:

$$R_X = R_X^0 + R_X^* = 0 + 14 = 14.$$

**Задача 5.2.** Визначити кількість розрядів вихідного регістра ЦП з фіксованою комою, призначеного для обчислення функції  $Y = 0,1 \sin X$ , якщо вхідний сигнал змінюється в межах  $-10 < X < 10$ , а с.к.в. помилки обчислення вихідного сигналу  $\delta_Y = 9 \cdot 10^{-4}$ .

#### Розв'язування

Максимальне значення вихідного сигналу:

$$Y = \max \{0, 1 \sin X\} = 0,1.$$

Максимальне значення машинної змінної у випадку формату з фіксованою комою 1.

Масштаб вхідного сигналу:

$$M_z = 2^{P_z} \quad 0,1.$$

Відповідний степінь двійки:

$$P_Y = \text{int}[\log_2 |Y|_{\max}] + 1 = \text{int}[\log_2 0,1] + 1 = -2.$$

Вибираємо  $P_Y = -1$ .

Визначаємо складові  $R_X^*$  та  $R_X^0$ :

$$R_Y^* = \text{int}[\log_2 |Y|_{\max}] - \text{int}[\log_2 \delta_Y] + 1 = \text{int}[\log_2 0,1] - \text{int}[\log_2 9 \cdot 10^{-4}] + 1 = 8.$$

$$R_Y^0 = P_Y - \text{int}[\log_2 |Y|_{\max}] - 1 = -1 - \text{int}[\log_2 0,1] - 1 = 1.$$

Кількість розрядів вихідного регістра:

$$R_Y = R_Y^0 + R_Y^* = 1 + 8 = 9.$$

**Задача 5.3.** Для умов, наведених в задачах 5.1 та 5.2, визначити розрядність ЦП, якщо с.к.в. методу обчислення функції  $\sin X$  дорівнює  $\delta_{Y\text{доп}} = 9 \cdot 10^{-4}$ , а кількість операцій в ітераційному процесі обчислення функції дорівнює 1200.

### Розв'язування

С.к.в. помилки округлення:

$$\sigma_{\text{окр}} = \sqrt{N/12} = \sqrt{1200/12} = 10.$$

Кількість розрядів для компенсації помилок округлення:

$$S = \text{int}[\log_2 \sigma_{\text{окр}}] + 1 = \text{int}[\log_2 10] + 1 = 4.$$

Розрахуємо допустиме значення інструментальної похибки:

$$\sigma_T = \sqrt{\left| \sigma_X \frac{d\Phi(X)}{dX} \right|_{\max}^2} = 5 \cdot 10^{-4} \cdot 0,1 |\cos X|_{\max} = 5 \cdot 10^{-5};$$

$$\sigma_{\text{ідоп}} = \sqrt{\sigma_{\text{доп}}^2 - \sigma_X^2 - \sigma_T^2} = 10^{-4} \sqrt{9^2 - 5^2 - 0,5^2} = 7,47 \cdot 10^{-4}.$$

Значення діапазону  $G$ :

$$G = \text{int}[\log_2 \delta_{\text{ідоп}}] - \text{int}[\log_2 \delta_{\text{доп}}] + R_\sigma = \text{int}[\log_2 7,47 \cdot 10^{-4}] - \text{int}[\log_2 9 \cdot 10^{-4}] + (14 - 9) = 5.$$

Значення  $S' = 0$ , оскільки  $S - G < 0$ . Отже

$$R_{\text{ЦП}} = R_X + S' = 14 + 0 = 14.$$

**Задача 5.4.** Визначити розрядність керуючого обчислювального засобу для вироблення сигналу шляхом обчислення функції  $y = f(x)$  (див. табл. 5.1). Відомо таке:

- 1) величина  $x$  змінюється в межах від  $-x_1$  до  $x_1$ ;
- 2) с.к.в. визначення аргументу дорівнює  $\sigma_x$ ;
- 3) допустиме значення с.к.в. обчислення сигналу дорівнює  $\sigma_{y\text{доп}}$ ;
- 4) с.к.в. помилки обчислення функції дорівнює  $\sigma_f$ ;
- 5) кількість операцій в процесі обчислення функції дорівнює  $N$ .

Таблиця 5.1 – Вихідні дані до задачі 5.4

Параметр	Остання цифра шифру									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f(x)$	$0,1\sin X$	$0,2\sin X$	$0,3\sin X$	$0,4\sin X$	$0,5\sin X$	$0,1\sin X$	$0,2\sin X$	$0,3\sin X$	$0,4\sin X$	$0,5\sin X$
$x_I$	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\sigma_x$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
$\sigma_{y\text{ доп}}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-4}$	$10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-4}$	$10^{-3}$
Параметр	Передостання цифра шифру									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\sigma_f$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
$N$	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	2400

**Задача 5.5.** Частотна передатна функція об'єкта регулювання має вигляд:

$$W_o(j\omega) = \frac{K}{j\omega T_1 + 1},$$

де  $K=0,7038$ ;  $T_1=30$  с. Визначити оптимальний період дискретизації в системі з цифровим ПІ-регулятором, що має коефіцієнт пропорційності  $K_p = 1,22$  і час ізодрому  $T_i = 30$  с. Необхідно забезпечити точність регулювання у сталому режимі  $\varepsilon = 3\%$ .

### Розв'язування

Частотна передатна функція ПІ-регулятора:

$$W_p(j\omega) = K_p \left(1 + \frac{1}{j\omega T_i}\right)$$

Передатна функція замкненої системи:

$$\frac{W_p(j\omega) W_o(j\omega)}{1 + W_p(j\omega) W_o(j\omega)} = \frac{K_p \left(1 + \frac{1}{j\omega T_i}\right) \frac{K}{j\omega T_1 + 1}}{1 + K_p \left(1 + \frac{1}{j\omega T_i}\right) \frac{K}{j\omega T_1 + 1}} = \frac{KK_p + jKK_p\omega T_i}{(KK_p - T_1T_i\omega^2) + jT_i(1 + KK_p)}$$

Згідно (5.25):

$$\left| \frac{W_p(j\omega) W_o(j\omega)}{1 + W_p(j\omega) W_o(j\omega)} \right| = \frac{\sqrt{K^2 K_p^2 + K^2 K_p^2 T_i^2 \omega^2}}{\sqrt{(KK_p - T_1T_i\omega^2)^2 + T_i^2 (1 + KK_p)^2}} = 0.03.$$

Розв'язавши це рівняння, знаходимо  $\omega_3 = 0,9534$ . Оптимальний період дискретизації:

$$T_0 = \frac{\pi}{\omega_3} = \frac{\pi}{0,9534} = 3,295 \text{ с.}$$

Приймаємо  $T_0 = 3$  с.

**Задача 5.6.** Для передатної функції об'єкта

$$W_0(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)},$$

де  $K=0,7$ ,  $T_1=40$  с,  $T_2=15$  с, визначити оптимальний період дискретизації  $T_0$  в системі з цифровим ПД-регулятором, параметрами якого є  $K_p = 1,5$ ,  $T_i = 120$  с,  $T_d = 40$  с. Необхідна точність регулювання у сталому режимі  $\varepsilon = 1\%$ .

Відповідь:  $T_0 < 0,449$  с.

**Задача 5.7.** Характеристику датчика-товщиноміра можна приблизно описати функцією  $u(\delta) = U_0\delta_0/(\delta + \delta_0)$ , де  $u(\delta)$  – вихідна напруга датчика,  $\delta$  – вимірювана величина:  $U_0$  і  $\delta_0$  – деякі константи, причому вимірювана товщина може змінюватися в межах від нуля до  $9\delta_0$ . Побудуйте графік функції  $u(\delta)$ . Розрахуйте необхідну розрядність  $n$  АЦП, що перетворює напругу  $u(\delta)$  в код, якщо після цифрової лінеаризації має бути забезпечений відлік не менше, чим 1000 градацій вимірюваної величини. Порівняйте з розрядністю АЦП для датчика з лінійною характеристикою

### Розв'язування

З виразу для функції  $u(\delta)$  видно, що при  $\delta = 0$  напруга датчика складає  $U_0$ , а при максимальному значенні вимірюваної товщини  $9\delta_0$  воно падає до  $0,1U_0$ . При розрядності АЦП  $n$  бітів квант напруги складає  $q = U_0/2^n$ . Цей розмір кванта повинен забезпечити необхідне розрізнення по товщині на ділянці характеристики з найменшим значенням похідної:

$$du(\delta)/d\delta = U_0\delta_0/(\delta + \delta_0)^2.$$

Розділивши квант напруги на найменшу похідну, рівну  $U_0/(100\delta_0)$ , отримуємо квант товщини, який згідно умови задачі повинен скласти не більш, ніж  $9\delta_0/1000$ . Таким чином, маємо нерівність:

$$100\delta_0/2^n < 9\delta_0/1000, \text{ або } 2^n > 100000/9 \approx 11111.$$

Найближче ціле  $n$ , що задовольняє останній нерівності, є рівним 14, при цьому  $2^n = 16384$ . При лінійній характеристиці датчика і повному використанні діапазону напруги  $0...U_0$  була б достатньою розрядність  $n = 10$ , при якій  $2^n = 1024$ .

**Задача 5.8.** Нехай характеристика датчика виражається параболічною функцією  $U_{\text{датч}} = ax + bx^2$ , причому приведена до діапазону перетворення нелінійність цієї характеристики по кінцевих точках складає 5%. На корисний постійний вхідний сигнал датчика накладена гармонічна завада, амплітуда якої складає 24% від діапазону. Вихідний сигнал датчика подається на АЦП, а результати перетворення обробляються контролером, що виконує усереднювання великого масиву кодових результатів (що містить декілька періодів завади) і лінеаризацію загальної характеристики вимірювального каналу. Знайдіть математичне очікування погрішності, викликаною завадою, якщо програміст порушив правило вибору послідовності операцій, і контролер

спочатку виконує усереднювання, а потім лінеаризацію отриманого результату.

### Розв'язування

Формула для погрішності (5.29) дозволяє знайти математичне очікування  $M$  систематичної погрішності, викликаною завадою, якщо відомий коефіцієнт  $b$  і дисперсія завади  $D(x_{ш})$ .

Дисперсія гармонічної завади є половиною квадрата її амплітуди: відповідно до умов даної задачі квадрат амплітуди завади складає  $0,24^2 = 0,0576$  від вхідної величини.

Для визначення коефіцієнта  $b$  можна скористатися вказівкою, що міститься в умові завдання, на значення нелінійності по кінцевих точках. Треба знайти максимальне відхилення параболи від прямої, що проходить через її кінцеві точки. Якщо позначити через  $x_{ш}$  значення вхідної величини датчика в кінці діапазону, то відповідна напруга датчика  $U_{датч}(x_{ш}) = ax_{ш} + bx_{ш}^2$ . Тоді коефіцієнт нахилу цієї прямої

$$k = (ax_{ш} + bx_{ш}^2) / x_{ш} = a + bx_{ш}.$$

Рівняння прямої

$$U_{лін} = kx = (a + bx_{ш})x.$$

Відхилення параболи від прямої

$$U_{датч} - U_{лін} = ax + bx^2 - (a + bx_{ш})x = bx(x - x_{ш}).$$

Модуль останнього виразу має максимум  $bx_{ш}^2/4 = 0,25 bx_{ш}^2$ ,

Це відхилення повинне скласти 5% від кінцевого значення вихідного сигналу датчика  $U_{датч}(x_{ш})$ . Таким чином, отримуємо рівняння:

$$0,25 bx_{ш}^2 = 0,05(ax_{ш} + bx_{ш}^2).$$

З нього знаходиться  $b = 0,25 \cdot a/x_{ш}$ . Кінцеве значення вихідного сигналу датчика:

$$ax_{ш} + bx_{ш}^2 = ax_{ш} + (0,25 \cdot a/x_{ш})x_{ш}^2 = 1,25 ax_{ш}.$$

Математичне очікування погрішності складе:

$$M = (0,25 \cdot a/x_{ш}) \cdot (0,0576 \cdot x_{ш}^2) = 0,0144 ax_{ш},$$

$$M = b \cdot (0,0576 \cdot x_{ш}^2) = 0,0144 ax_{ш},$$

що після приведення до кінцевого значення вихідного сигналу дасть

$$(0,0144 ax_{ш}) / (1,25 ax_{ш}) = 0,01152 \approx 1,2\%.$$

**Задача 5.9.** Виконайте розрахунки згідно умов задачі 5.8 для випадку, коли нелінійність характеристики датчика складає 20%.

**Задача 5.10.** Результати перетворення 12-розрядного АЦП вводяться у 8-розрядний контролер з двобайтовою розрядною сіткою. Для фільтрації завад

виконується підсумовування декількох відліків. Скільки відліків можна підсумовувати, не побоюючись переповнювання розрядної сітки контролера?

**Задача 5.11.** У контур регулювання рівня рідини входять рівнемір класу точності 1,0 з межею вимірювання 3 м і програмований контролер. Розрахуйте розрядність АЦП пристрою зв'язку з об'єктом, якщо допустима похибка регулювання становить 3 см.

### Розв'язування

Максимальна зведена похибка рівнеміра класу 1,0  $\gamma = 1\%$ . Відповідна абсолютна похибка:

$$\Delta = \frac{\gamma y_{\max}}{100} = \frac{1 \cdot 3}{100} = 0,03 \text{ м.}$$

Вважаючи, що похибка розподілена за нормальним законом, прийmemo  $\Delta = 3\sigma$ . Звідси  $\sigma = 0,01$  м.

Згідно (5.3), число розрядів АЦП:

$$n = \log_2 \frac{y_{\max}}{\rho \sigma 2\sqrt{3}} = \log_2 \frac{3}{0,4 \cdot 0,01 \cdot 2\sqrt{3}} = 8.$$

З іншого боку, необхідне число розрядів залежить від допустимої помилки регулювання  $\hat{\Gamma}_d \approx 3\sigma_d$ . Згідно (5.6):

$$n = \log_2 \frac{y_{\max} \sqrt{1 + \rho^2}}{0,34 \rho \sigma_d} = \log_2 \frac{3 \sqrt{1 + 0,4^2}}{0,34 \cdot 0,4 \cdot (0,03/3)} = 12.$$

З двох значень  $n$  вибираємо більше:  $n = 12$ .

**Задача 5.12.** Виконайте проектування мікропроцесорного регулятора тиску. Розрахуйте оптимальний період опитування датчика тиску, допустиму похибку розрахунків, розрядність АЦП та ЦАП. Вихідні дані для розрахунку: параметри регулятора  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ , параметри передатної функції об'єкта  $K$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  (вигляд передатної функції такий, як у задачі 5.6), допустима помилка управління  $\varepsilon_d$ , клас точності датчика тиску  $K_T$ , діапазон вимірювання  $0 - y_{\max}$ , допустима с.к.в. похибки вироблення керуючої дії  $\sigma_u$  (див. табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Вихідні дані до задачі 5.12

<b>Варіант</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
$K_p$	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
$T_i, \text{с}$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
$T_d, \text{с}$	15	20	30	–	15	20	30	–	15	20
$K$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4
$T_1, \text{с}$	30	25	35	40	45	23	18	32	38	22
$T_2, \text{с}$	10	12	14	16	18	–	20	–	15	11
$\varepsilon_d, \text{кПа}$	5	10	50	20	25	30	100	40	45	250
$K_T$	0,5	1,0	0,25	1,0	0,5	1,0	0,25	1,0	1,5	0,5
$u_{\max}, \text{МПа}$	0,4	0,6	1,6	2,5	2,5	2,5	1,6	1,6	4	2,5
$\sigma_u, \text{кПа}$	10	10	10	20	20	20	30	30	30	40
<b>Варіант</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
$K_p$	2	2,1	2,1	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9
$T_i, \text{с}$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
$T_d, \text{с}$	15	–	20	–	30	–	40	–	50	–
$K$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4
$T_1, \text{с}$	30	25	35	40	45	23	18	32	38	22
$T_2, \text{с}$	10	–	14	16	18	19	20	–	15	11
$\varepsilon_d, \text{кПа}$	10	30	20	200	30	300	50	40	400	40
$K_T$	0,5	1	0,25	1	0,5	1	0,25	1	1,5	0,5
$u_{\max}, \text{МПа}$	0,4	0,6	1,6	2,5	2,5	2,5	1,6	1,6	4	2,5
$\sigma_u, \text{кПа}$	10	10	10	20	20	20	30	30	30	40

## 6 ПРОЕКТУВАННЯ ЛОКАЛЬНИХ МЕРЕЖ

### 6.1 Теоретичні відомості і розрахункові співвідношення

#### 6.1.1 Стандарти мережі Ethernet

Локальні мережі найчастіше будуються на основі стандартів Ethernet і Fast Ethernet.

*Стандарт 10BASE5* визначає сегмент Ethernet на основі товстого коаксіального кабелю з топологією «шина» завдовжки до 500 метрів. До одного сегменту (завдовжки до 500 метрів) допустиме підключення не більше 100 абонентів. Максимальна кількість сегментів при реалізації усїєї мережі тільки на товстому коаксіальному кабелі не повинна перевищувати п'яти (загальна довжина мережі – 2,5 км). Для з'єднання п'яти сегментів буде потрібні чотири репітери. При цьому повинне застосовуватися правило "5-4-3", тобто не більше 5 сегментів, не більше 4 репітерів і не більше 3 сегментів, до яких можуть бути приєднані комп'ютери (рис. 6.1).

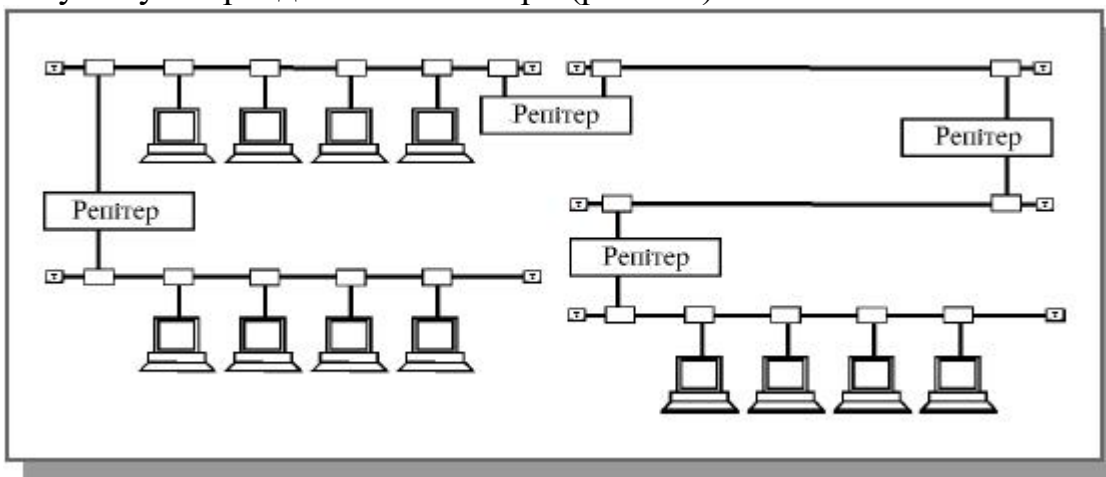


Рис. 6.1

*Стандарт 10BASE2* визначає сегмент на основі тонкого коаксіального кабелю з топологією шина завдовжки до 185 метрів ( $\approx 200$  метрів, на це вказує цифра 2 в назві сегменту). Між кожною парою абонентів прокладається окремий шматок кабелю з двома байонетними конекторами типу BNC на кінцях. На кінцях сегменту (на конектори крайніх адаптерів) включаються 50-омні термінатори, тільки один з яких необхідно заземлити. Для збільшення довжини мережі можна використовувати репітери, кількість сегментів не повинна перевищувати п'яти (загальна довжина мережі складе 925 метрів, потрібно чотири репітери). Як і у разі 10BASE5, необхідно дотримуватись правила "5-4-3", тобто тільки на трьох сегментах можуть розташовуватися комп'ютери. До одного сегменту може підключатися до 30 абонентів, включаючи і репітери.

*Стандарт 10BASE-T* визначає сегмент Ethernet на основі неекранованих витих пар (Twisted Pair) з топологією "пасивна зірка". Вимагає обов'язкового застосування концентратора (хаба). Передача сигналів здійснюється по двох

витих парах дротів, кожна з яких передає тільки в один бік (одна пара – передавальна, інша – приймальна). Можливе з'єднання кількох концентраторів між собою для отримання деревовидної структури, Між двома абонентами не може бути більше чотирьох концентраторів. Довжина сполучного кабелю між адаптером і концентратором не повинна перевищувати 100 м. Кабелі приєднуються до адаптера і до концентратора 8-контактними конекторами типу RJ - 45.

*Стандарт 10BASE-F* використовує оптоволоконний кабель. Передача інформації йде по двох кабелях, що передають сигнали в різні боки. Оптоволоконний трансивер перетворює електричний сигнал в оптичний при передачі і навпаки при прийомі. Для приєднання трансивера до адаптера застосовується кабель на основі неекраниваних витих пар, довжина його не повинна перевищувати 25 м. Довжина оптоволоконних кабелів, що сполучають трансивер і концентратор, може досягати 2 км без застосування ретрансляторів. У 10BASE-F застосовується багатомодовий кабель, проте є апаратура і для використання одномодового кабелю (з граничною довжиною до 5 км). Кабель повинен мати на обох кінцях оптоволоконні байонетні ST-конектори. Використовуються також оптоволоконні конектори типу SC, що приєднуються подібно до RJ-45 шляхом простого вставлення в гніздо. Найчастіше сегмент 10BASE-F використовується для з'єднання двох концентраторів, до яких підключаються комп'ютери за стандартом 10BASE-T. Таким чином, вдається поєднати достоїнства обох стандартів – низьку вартість 10BASE-T і великі відстані 10BASE-F.

Є модифікації цього стандарту: FOIRL (відстань до 1000 м), 10Base-FL (відстань до 2000 м), 10Base-FB (відстань до 2000 м).

*Стандарт Fast Ethernet 100BASE-TX* дозволяє не лише підвищити швидкість передачі, але і істотно понизити ризик перевантаження мережі. Використовується мережа з топологією пасивна зірка з використанням зведеної витій пари. Об'єднання комп'ютерів в мережу не відрізняється від схеми за стандартом 10BASE-T. Довжина кабелю не може перевищувати 100 м (стандарт рекомендує обмежуватися довжиною в 90 м). Використовується пасивна зірка з концентратором в центрі. Стандарт передбачає також можливість застосування екранованого кабелю з двома витими парами дротів (хвильовий опір 150 Ом). В цьому випадку повинен застосовуватися 9-контактний екранований конектор DB-9.

*Стандарт 100BASE-T4* відрізняється тим, що передача виробляється не по двох, а по чотирьох неекраниваних витих парах (кабель UTP). Обмін даними йде по одній передавальній витій парі, по одній приймальній витій парі і по двох двонаправлених витих парах з використанням трирівневих диференціальних сигналів.

*Стандарт 100BASE-FX* використовує оптоволоконний кабель. Апаратура 100BASE-FX дуже близька до апаратури 10BASE-FL. Використовується топологія пасивна зірка з підключенням комп'ютерів до концентратора за допомогою двох різноспрямованих оптоволоконних кабелів.

Максимальна довжина кабелю між комп'ютером і концентратором складає 412 м. Застосовується багатомодовий або одномодовий кабель.

### 6.1.2 Проектні розрахунки мереж

Для вибору засобів передачі інформації необхідно вирішити три взаємозв'язані завдання:

- 1) розрахувати інформаційні потоки і визначити необхідні пропускні спроможності каналів зв'язку;
- 2) визначити середовище передачі інформації, типів каналів зв'язку, мережеву архітектуру;
- 3) вибрати технічні засоби, уточнити і описати загальну схему передачі інформації.

Навантаження на мережу – це об'єм даних, що реально передаються по мережі в одиницю часу. Розрахунок навантаження на мережу здійснюється згідно формули:

$$V = nv_i, \quad (6.1)$$

де  $n$  - число комп'ютерів в мережі,  $v_i$  - навантаження на один комп'ютер в мережі. Розрахунок навантаження на один комп'ютер в мережі здійснюється наступним чином:

$$v_i = D/t, \quad (6.2)$$

де  $D$  - кількість переданих даних,  $t$  - час, за який були передані дані.

Пропускна спроможність  $v_{\max}$  – це максимально можлива для даної мережі швидкість передачі даних, яка визначається бітовою швидкістю і деякими іншими обмежуючими чинниками (тривалість інтервалів між блоками даних, об'єм передаваної по мережі службової інформації та ін.). Значення пропускної спроможності для мережевих технологій відомі і наводяться в стандарті на мережу. В більшості випадків можна прийняти пропускну спроможність рівною бітовій швидкості.

Коефіцієнт використання мережі дорівнює відношенню навантаження на мережу до пропускної спроможності:

$$h = V/v_{\max}. \quad (6.3)$$

При виборі конфігурації мережі Ethernet, що складається з сегментів різних типів, виникає багато питань, пов'язаних з максимально допустимим розміром (діаметром) мережі і максимально можливим числом різних елементів. Як одиниця вимірювання часу використовується бітовий інтервал  $bt$  – час передачі одного бітового імпульсу.

Використовуються дві системи розрахунків часових характеристик мережі.

*Перша система* передбачає обчислення подвійного (кругового) часу проходження сигналу по мережі (Path Delay Value, PDV) і порівняння його з максимально допустимою величиною  $575 bt$ .

У мережі Ethernet і її модифікаціях (Fast Ethernet і Gigabit Ethernet) час передачі кадру мінімальної довжини  $T_{\min}$  має бути більше часу подвійного обертання сигналу в сегменті PDV:

$$T_{\min} > PDV. \quad (6.4)$$

PDV складається із затримок сигналів в кабелях і затримок, що вносяться повторювачами (концентраторами, репітерами) і мережевими адаптерами.

Затримки, що вносяться проходженням сигналів по кабелю, розраховуються на підставі даних табл. 6.1. Затримка, яку вносить пара мережових адаптерів, що взаємодіють через повторювач (або порт комутатора), береться з табл. 6.2.

Таблиця 6.1

Тип кабелів	Подвоєна затримка, bt на 1 м	Подвоєна затримка на кабелі максимальної довжини сегмента
Вита пара	1,112 bt	111,2 bt
Оптоволокно	1,0 bt	412 bt

Таблиця 6.2

Тип мережових	Максимальная затримка
Пара адаптерів TX/FX	100 bt
Пара адаптерів T4	138 bt
Один TX/FX і один T4	127 bt
Комутатор	140 bt

Для спрощення розрахунків використовуються довідкові дані IEEE. У таблиці 6.3 наведені дані, необхідні для розрахунку значення PDV для фізичних стандартів мереж Ethernet. Лівим тут називається сегмент, в якому починається шлях сигналу від виходу передавача. Потім сигнал проходить через проміжні сегменти і доходить до приймача найбільш віддаленого вузла найбільш віддаленого сегменту, який називається правим.

Таблиця 6.3

Тип сегменту	База лівого сегменту, bt	База проміжного сегменту, bt	База правого сегменту, bt	Затримка середовища на 1 м, bt	Максимальна довжина сегменту, м
10Base-5	11,8	46,5	169,5	0,0866	500
10Base-2	11,8	46,5	169,5	0,1026	185
10Base-T	15,3	42,0	165,0	0,113	100
10Base-FB	—	24,0	—	0,1	2000
10Base-FL	12,3	33,5	156,5	0,1	2000
FOIRL	7,8	29,0	152,0	0,1	1000

Методика розрахунку величини затримок:

1) у мережі виділяється шлях максимальної довжини, тобто визначається, які дві станції і відповідні сегменти є найбільш віддаленими, довжина кожного зв'язку після визначення збільшується на 15%;

2) розраховується подвійний час проходження в кожному сегменті виділеного шляху по формулі:  $t_s = L * t_l + t_o$ , де  $L$  - це довжина сегменту в метрах, значення  $t_l$  і  $t_o$  беруться з таблиці 6.3 ( $t_o$  – база сегменту, що враховує затримки у апаратурі,  $t_l$  – затримка на 1 м кабелю);

3) якщо довжина сегменту дорівнює максимально допустимій, то з таблиці 6.1 для нього береться величина максимальної затримки  $t_m$ ;

4) сумарна величина затримок усіх сегментів виділеного шляху не повинна перевищувати граничної величини 575 бітових інтервалів;

5) потім необхідно виконати ті ж дії для зворотного напрямку вибраного шляху (тобто в даному випадку кінцевий сегмент вважається початковим і навпаки);

6) якщо затримки в обох випадках не перевищують величини 575 bt, то мережа вважається працездатною.

Проте для того, щоб зробити остаточний висновок про працездатність мережі, недосить розрахунку подвійного часу проходження.

Друга система розрахунків базується на визначенні скорочення міжкадрового інтервалу (Path Variability Value, PVV). Перевіряється відповідність стандарту величини міжпакетного інтервалу (IPG - InterPacket Gap). Ця величина не може бути менше 96 бітових інтервалів, тобто тільки через 9,6 мкс після звільнення мережі абоненти можуть почати свою передачу. Проте при проходженні пакетів через репітери і концентратори міжпакетний інтервал може скорочуватися, внаслідок чого два пакети можуть сприйматися абонентами як один. Допустиме скорочення міжкадрового інтервалу PVV при проходженні послідовності кадрів через усі повторювачі має бути не більше, ніж 49 бітових інтервалів. Оскільки при відправці кадрів кінцеві вузли забезпечують початкову міжкадрову відстань в 96 бітових інтервалу, то після проходження повторювача вона має бути не менше, ніж  $96 - 49 = 47$  бітових інтервалів.

Для розрахунку PW можна скористатися значеннями максимальних величин зменшення міжкадрового інтервалу при проходженні різних фізичних середовищ, рекомендованими IEEE і наведеними в табл. 6.4.

Таблиця 6.4

Тип сегменту	Передавальний сегмент, bt	Проміжний сегмент, bt
10Base-5 або 10Base-2	16	11
10Base-FB	—	2
10Base-FL	10,5	8
10Base-T	10,5	8

## 6.2 Приклади і задачі для самостійного розв'язання

**Задача 6.1.** Виконайте розрахунок навантаження на мережу, яка складається з 100 комп'ютерів. Кожний комп'ютер може передавати 3 Мбайт за хвилину.

### Розв'язування

Використовуємо для розрахунку формули (6.1) та (6.2). В даному випадку:  $D = 3$  Мбайт,  $t = 60$  с, тоді

$$v_i = D/t = 3/60 = 0,05 \text{ Мбайт/с.}$$

Загальне навантаження на мережу складає:

$$V = nv_i = 100 \cdot 0,05 = 5 \text{ Мбайт/с.}$$

**Задача 6.2.** Для умов задачі 6.1 розрахуйте коефіцієнт використання мережі 100BASE-TX.

### Розв'язування

Для стандарту 100BASE-TX пропускна спроможність складає 100 Мбіт/с = 12,5 Мбайт/с. Згідно формули (6.3):

$$h = V/v_{\max} = 5/12,5 = 0,4.$$

**Задача 6.3.** Визначте можливість використання мережі Ethernet, якщо конфігурація найбільшого сегменту має вигляд, показаний на рис. 6.1. Використовується віта пара UTP Cat5.



Рис. 6.1

### Розв'язування

Затримка, що вноситься проходженням сигналу по кабелю, у відповідності до даних табл. 6.1 складає

$$t_{з.к.} = 1,112(57+32) = 98,968 \approx 100 \text{ нс.}$$

Пара адаптерів ТХ вносять затримку 100 нс, комутатор 140 нс. Загальна затримка

$$PDV = 100 + 100 + 140 = 340 \text{ нс.}$$

Оскільки отримане значення PDV менше допустимого значення 575 нс, використання мережі Ethernet є можливим.

**Задача 6.4.** Виконати проектний розрахунок мережі, показаної на рис. 6.2.

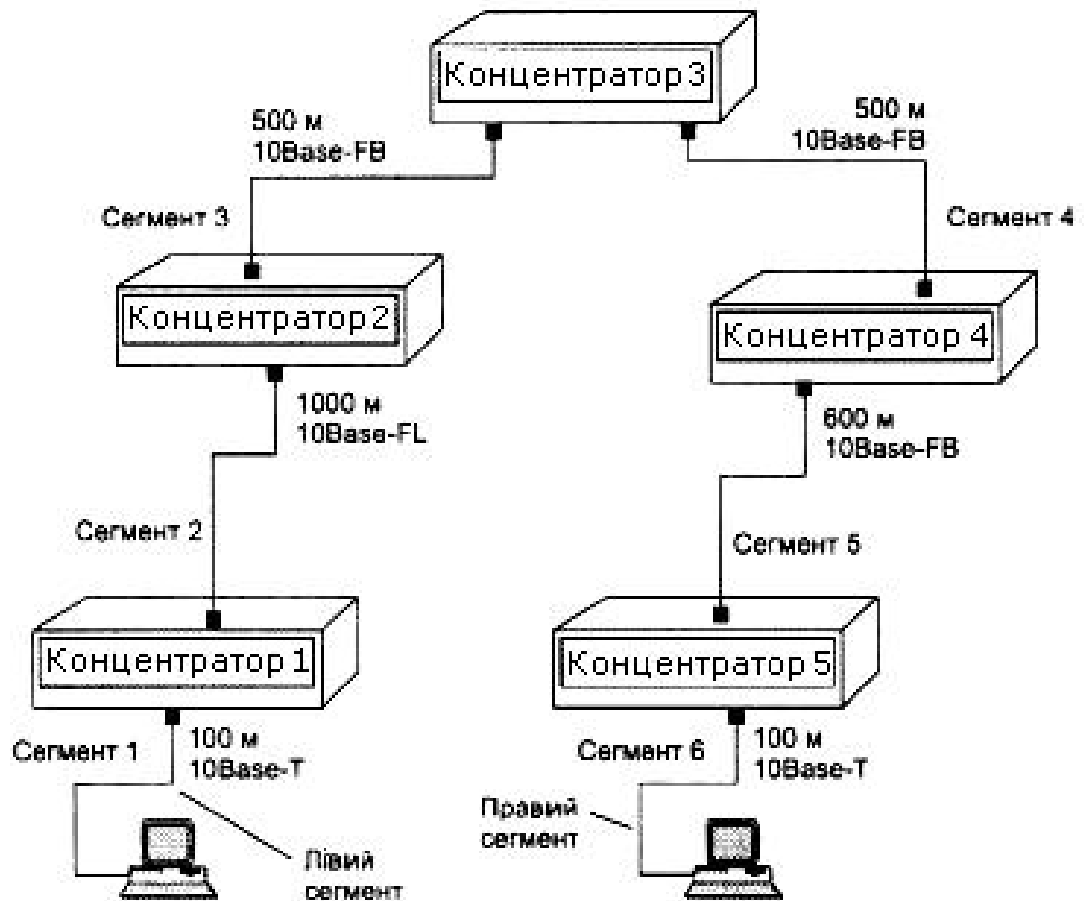


Рис. 6.2

### Розв'язування

Оскільки лівий і правий сегменти мають різні величини затримки повторювачів, то в разі різних типів сегментів (коаксіал, кручена пара, оптоволокно) на віддалених краях мережі необхідно виконати розрахунки двічі: один раз прийняти як лівий сегмент одного типу, а другий – сегмент іншого типу. Результатом вважається максимальне значення PDV.

У мережі, зображеної на рис. 6.2 обидва крайніх сегмента належать до одного типу (10Base-T, кручена пара) тому подвійний розрахунок не потрібен.

Виконаємо розрахунок PDV для цієї мережі.

Лівий сегмент 1:

$$15,3 \text{ (повторювач)} + 100 \cdot 0,113 \text{ (кабель)} = 26,6.$$

Проміжний сегмент 2:

$$33,5 \text{ (повторювач)} + 1000 \cdot 0,1 \text{ (кабель)} = 133,5.$$

Проміжний сегмент 3:

$$24 \text{ (повторювач)} + 500 \cdot 0,1 \text{ (кабель)} = 74,0.$$

Проміжний сегмент 4:

$$24 \text{ (повторювач)} + 500 \cdot 0,1 \text{ (кабель)} = 74,0.$$

Проміжний сегмент 5:

$$24 \text{ (повторювач)} + 600 \cdot 0,1 \text{ (кабель)} = 84,0.$$

Правий сегмент 6:

$$165 \text{ (повторювач)} + 100 \cdot 0,113 \text{ (кабель)} = 176,3.$$

Разом PDV: 568,4 бітових інтервалів. Оскільки це значення менше максимально допустимої величини 575 bt, то ця мережа проходить за критерієм часу подвійного обороту сигналу незважаючи на те, що кількість повторювачів більше 4-х. Однак, щоб визнати конфігурацію мережі коректною, потрібно також розрахувати зменшення міжкадрового інтервалу (PVV).

Відповідно до даних табл. 6.4, розрахуємо значення.

Лівий сегмент 1 10Base-T: скорочення в 10,5 bt.

Проміжний сегмент 2 10Base-FL: 8 bt.

Проміжний сегмент 3 10Base-FB: 2 bt.

Проміжний сегмент 4 10Base-FB: 2 bt.

Проміжний сегмент 5 10Base-FB: 2 bt.

Разом PVV: 24,5 bt. Це менше граничного значення в 49 bt. Таким чином, мережа відповідає стандартам Ethernet по всіх параметрах, хоча і включає в себе більше чотирьох повторювачів.

**Задача 6.5.** Виконати проектний розрахунок мережі, подібної до показаній на рис. 6.2, взявши характеристики сегментів з табл. 6.5. Зверніть увагу, що не для всіх варіантів обидва крайніх сегмента належать до одного типу. В цих випадках необхідний подвійний розрахунок.

Таблиця 6.5 – Вихідні дані до задачі 6.5

Варіант	Сегмент 1	Сегмент 2	Сегмент 3	Сегмент 4	Сегмент 5	Сегмент 6
0	10Base-T, 50 м	10Base-FB, 800 м	10Base-FL, 1000 м	10Base-FB, 500 м	10Base-FL, 600 м	10Base-2, 50 м
1	10Base-2, 100 м	10Base-FL, 1200 м	10Base-FB, 1600 м	10Base-FB, 1500 м	10Base-FL, 800 м	10Base-2, 100 м
2	10Base-5, 80 м	10Base-FB, 1100 м	10Base-FL, 900 м	10Base-FB, 800 м	10Base-FL, 700 м	10Base-2, 150 м
3	10Base-2, 150 м	10Base-FL, 700 м	10Base-FB, 1200 м	10Base-FL, 700 м	10Base-FB, 1600 м	10Base-2, 50 м
4	10Base-5, 120 м	10Base-FL, 1700 м	10Base-FB, 1500 м	10Base-FL, 600 м	10Base-FB, 1600 м	10Base-2, 80 м
5	10Base-T, 80 м	10Base-FB, 1000 м	10Base-FL, 800 м	10Base-FB, 1000 м	10Base-FL, 1200 м	10Base-T, 100 м
6	10Base-5, 120 м	10Base-FB, 900 м	10Base-FL, 1100 м	10Base-FB, 1000 м	10Base-FL, 1000 м	10Base-T, 120 м
7	10Base-2, 70 м	10Base-FB, 1400 м	10Base-FB, 980 м	10Base-FL, 1300 м	10Base-FL, 900 м	10Base-5, 50 м
8	10Base-T, 40 м	10Base-FB, 1500 м	10Base-FL, 820 м	10Base-FB, 1600 м	10Base-FL, 1000 м	10Base-5, 90 м
9	10Base-T, 60 м	10Base-FB, 1300 м	10Base-FL, 1200 м	10Base-FB, 1200 м	10Base-FL, 1500 м	10Base-T, 70 м

**Задача 6.6.** Спроекувати цехову мережу, що охоплює АРМ начальника цеху 1 шт., АРМ диспетчера 1 шт., АРМ операторів 3 шт., АРМ складу готової продукції 2 шт., АРМ цехової лабораторії 1 шт. Склад готової продукції і лабораторія розміщені в окремих приміщеннях, які відстоять від основного приміщення цеху на відстані  $l_1$  та  $l_2$  відповідно (див. табл. 6.6). Продуктивність кожного комп'ютера  $v_i$ .

Таблиця 6.6 – Вихідні дані до задачі 6.6

<b>Варіант</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
Відстань $l_1$ , м	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	500	100
Відстань $l_2$ , км	0,8	1,2	1,4	1,8	0,5	0,7	1	1,1	0,08	2	1,4	0,7
Продуктивність $v_i$ , Кбайт/с	1	5	2	1	1	5	2,4	5	5	10	1	5
<b>Варіант</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>
Відстань $l_1$ , м	1500	200	250	300	350	400	1450	500	50	100	150	200
Відстань $l_2$ , м	0,4	0,6	1,5	0,42	1,1	0,9	0,07	3	0,2	0,3	0,4	0,5
Продуктивність $v_i$ , Кбайт/с	2	5	5	10	12	5	16	5	5	5	2	5

## 7 МОДЕЛЮВАННЯ ЛОКАЛЬНИХ МЕРЕЖ

### 7.1 Основні можливості пакету NetCracker Pro

NetCracker Professional – програмний пакет, розроблений фірмою NetCracker Technology, який дозволяє створювати проекти обчислювальних мереж різної складності і топології, використовуючи технологію імітаційного моделювання роботи мережі. Дозволяє провести експерименти, результати яких можуть бути використані для обґрунтування вибору типу мережі, середовищ передачі, мережевих компонент устаткування і програмно-математичного забезпечення. Програмні засоби NetCracker дозволяють виконати збір відповідних даних про існуючу мережу без зупинки її роботи, створити проект цієї мережі і виконати необхідні експерименти для визначення граничних характеристик, можливості розширення, зміни топології і модифікації мережного обладнання з метою подальшого її вдосконалення і розвитку.

Для проектування структури мережі програма надає можливість вибору необхідного обладнання з вбудованої бази даних. Користувач розміщує обрані компоненти на складальному полі, задає структуру і тип зв'язків між ними, визначає тип програмного забезпечення і характер трафіка між вузлами мережі. Надалі є можливість вказати перелік аналізованих характеристик і вид відображення статистичної інформації і виконати імітаційне моделювання спроектованої мережі.

На рис. 7.1 наведено типовий вигляд вікна програми NetCracker.

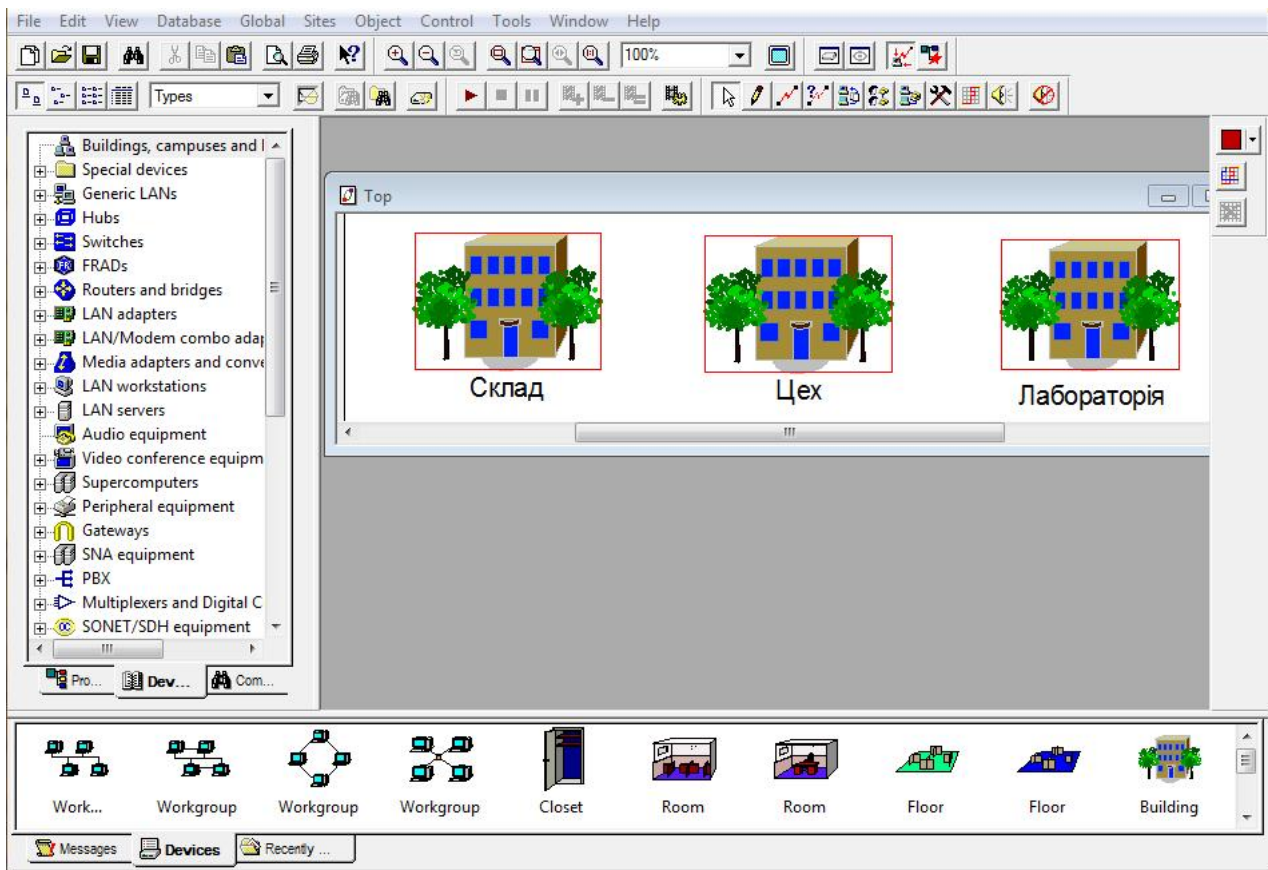


Рис. 7.1

У правій верхній частині головного вікна програми розташовується основна панель, яка являє собою складальне поле. У ньому необхідно розміщувати використовувані компоненти при проектуванні структури мережі.

В лівій частині вікна розміщена панель перегляду компонент, наявних у базі даних, вона виводиться за допомогою меню *View⇒Bars⇒Browser Pane*.

Панель містить кілька закладок.

Закладка *Project Hierarchy* призначена для відображення структури документів створюваного проекту мережі.

Закладка *Devices* призначена для відображення бази даних пристроїв.

Перелік пристроїв має кілька видів відображення.

*Types* (Типи) – пристрої в списку групуються за типами.

*Vendors* (Продуценти) – пристрої в списку групуються за виробниками.

*User* (Користувальницькі) – пристрої, визначені користувачем.

Закладка *Compatible Devices* призначена для відображення списку сумісних пристроїв.

У нижній частині вікна програми зазвичай розташовується панель пристроїв, яка може бути відображена за допомогою меню *View⇒Bars⇒Image Pane*. Ця панель призначена для відображення пристроїв з вибраної групи, які можна перетягнути мишею на складальне поле.

Методика створення проекту комп'ютерної мережі в середовищі NetCracker, включає п'ять основних кроків:

а) в робоче вікно проекту заноситься мережеве обладнання, яке буде використовуватися для побудови мережі (при необхідності додаються мережеві адаптери);

б) встановлюються зв'язки між пристроями в режимі *Link devices*;

в) задається трафік в режимі *Set Traffic*;

г) налаштовується відображення необхідних статистичних даних;

д) запускається процес імітації мережі.

Побудова структури мережі здійснюється наступним чином. Користуючись панеллю перегляду компонент, треба вибрати відповідний клас і тип пристрою. Після цього потрібно вибрати пристрій в панелі пристроїв, перетягнути його в складальне поле і розмістити в потрібному місці.

Для відображення реальної структури мережі організації бажано використовувати такі класи компонент, як *City* (Місто), *Building* (Будівля), *Campus* (Університет), *Floor* (Поверх) і *Room* (Кімната). Кожен з цих об'єктів має своє складальне поле, розкрити яке можна за допомогою меню *Object* ⇒ *Expand* або з контекстного меню, що викликається правою клавішею миші (ПКМ). У новому вікні, що відкривається при виконанні даної команди, можна побудувати ту частину мережі, яка відповідає вибраному об'єкту.

Деякі пристрої вимагають установки певних компонентів для виконання ними необхідних функцій. Так, наприклад, багато робочих станцій поставляються без мережевих карт. У такому випадку треба знайти потрібний пристрій, і перетягнути його на відповідний об'єкт. Слід враховувати кількість слотів у пристрої та їх тип при встановленні додаткового обладнання. Якщо у пристрої немає вільних слотів, встановити в нього будь-що буде скрутно. Для перегляду і редагування параметрів пристроїв використовуються команди *Properties*, *Open*, *Configuration*, *Configure Ports* з меню *Object* або команди *Configuration* і *Properties* з контекстного меню.

Для завдання зв'язків між пристроями (а точніше між їх інтерфейсами або портами) необхідно скористатися кнопкою *Link Devices* на панелі режимів, яка включається командою меню *View* ⇒ *Bars* ⇒ *Modes* (рис. 7.2).



Рис. 7.2

Після завдання структури мережі і топології зв'язків визначаються склад і розташування використовуваного програмного забезпечення. Для цього необхідно на лівій панелі в списку компонентів вибрати категорію *Network and enterprise software*, в ній знайти необхідне програмне забезпечення і помістити його на відповідний об'єкт в мережі.

Надалі визначається трафік між вузлами мережі. Для завдання трафіка необхідно скористатися кнопкою *Set Traffic* на панелі режимів (рис. 7.3).



Рис. 7.3

Після цього необхідно послідовно вибирати пари абонентських станцій (АС) мережі, між якими буде заданий трафік. Порядок клацань на АС визначає напрямок передачі – спочатку зазначається передавач, потім приймач. У результаті з'являється діалогове вікно *Profiles*, що дозволяє задати тип і основні характеристики трафіка. Тип трафіка вибирається зі списку *Profiles List*, причому вказується за принципом "запити клієнта до сервера", тобто як приймач може виступати тільки той пристрій, на якому функціонує відповідне програмне забезпечення (HTTP/FTP Server, SQL server, File Server).

InterLAN traffic – це зовнішній трафік локальної мережі з обсягом повідомлення 100 Мбайт.

Small InterLAN traffic – це зовнішній трафік малого офісу з обсягом повідомлення 10 Мбайт.

Small office traffic – трафік обміну між робочими станціями.


Перед тим як приступити до процесу завдання мережевого трафіка необхідно налаштувати параметри сервера, зокрема встановити необхідне програмне забезпечення (ПЗ) відповідно до використовуваних видів трафіка, а потім встановити параметри розміру відповіді сервера і затримки відповіді. Сервер може обслуговувати клієнтів баз даних (SQL server), CAD/CAM-додатків (системи автоматизованого проектування або системи автоматизованого виробництва) і/або надавати FTP-доступ до файлів (FTP server). Додати відповідне ПЗ можна з групи *Network and enterprise software (Database⇒Hierarchy⇒Types⇒Network and enterprise software)*. З розділу *Server software* необхідно перенести методом drag-and-drop на сервер іконку одного з ПЗ. Після такої установки ПЗ буде можливо призначати клієнт-серверні трафіки.

Додати інші види серверного трафіка можна у властивостях ПЗ сервера. Для цього необхідно зайти в конфігурацію сервера, натиснувши подвійним клацанням лівою кнопкою миші на іконку сервера на робочому полі, після чого відкриється вікно *Server configuration*, де у вкладці *Traffic* необхідно відзначити галочками використовуваний трафік – FTP, CAD/CAM client-server, Database client-server, SQL тощо.

Потім у вікні *Server configuration* у вкладці *Server* необхідно встановити розмір відповіді сервера на запит (*Reply Size*) і затримку відповіді на запит (*Replay Delay*).

Перегляд та зміна конфігурації трафіку здійснюються таким чином. З меню *Global* вибирають команду *Data Flow*. Тепер можна змінити тип трафіка від однієї станції до іншої, виділивши його і натиснувши кнопку **Edit**, змінити колір, видалити (**Delete**), зробити прихованим (**Set Invisible**) або видимим (**Set Visible**).

Для вказівки аналізованих характеристик слід скористатися командою *Statistics* з контекстного меню або *Define Statistics* з меню *Object*. У діалоговому вікні *Statistical Items* можна задати тип характеристики та спосіб відображення статистичної інформації в процесі моделювання. Це діалогове вікно буде різним для різних типів об'єктів, тобто може змінюватися перелік характеристик, а також деякі способи відображення інформації можуть бути недоступні. Для одного об'єкта (вибраного пристрою, з'єднання або потоку даних) можна вибирати кілька способів відображення інформації (індикатор, число, графік).

Після цього вже можна проводити імітаційне моделювання роботи мережі. Для управління процесом моделювання використовуються команди меню *Control: Start* для запуску, *Pause* для призупинення і *Stop* для повної зупинки процесу моделювання. Можна також використати кнопки  панелі інструментів.

Для перегляду узагальнених результатів моделювання використовується команда *Associated Data Flow* з меню *Object* або з контекстного меню. В результаті виконання даної команди у вікні відображається статистика за процентним співвідношенням кількості пакетів для вхідних (*Incoming Traffic*) і вихідних з'єднань (*Outgoing Traffic*).

Для більш точної оцінки працездатності комп'ютерної мережі можна виміряти наступні характеристики роботи мережевого обладнання (табл. 7.1).

Таблиця 7.1 – Характеристики роботи мережевого обладнання

Назва характеристики	Назва характеристики в NetCracker Professional
Поточне використання мережевого обладнання	Current utilization
Середнє використання мережевого обладнання	Average utilization
Середня затримка	Average delay
Середнє робоче навантаження	Average workload
Поточне робоче навантаження	Current workload
Пакети, передані за останню секунду	Packets for last seconds
Пакети, втрачені за останню секунду	Packets dropped for last seconds

За допомогою команд, що містяться в пункті меню *Tools* ⇒ *Reports*, можна створити звіти, які узагальнюють результати виконаної роботи.

## 7.2 Приклади і задачі для самостійного розв'язання

**Задача 7.1.** Виконайте імітаційне моделювання цехової мережі, що охоплює АРМ начальника цеху 1 шт., АРМ операторів 2 шт., АРМ складу готової продукції 1 шт., АРМ цехової лабораторії 1 шт. Продуктивність АРМ 2

Кбайт/с. Склад готової продукції і лабораторія розміщені в окремих приміщеннях, які відстоять від основного приміщення цеху на відстані 800 м та 1000 м відповідно. Забезпечити зв'язок цехової мережі з мережею автоматизованої системи керування технологічним процесом (АСК ТП), відстань лінії зв'язку 500 м.

### Розв'язування

Використовуємо програмний пакет NetCracker Professional.

В меню *File* вибираємо опцію *New*. З панелі пристроїв перетягуємо на складальне поле іконку *Building* (Будівля). Зачепивши мишею чорний квадратик у кутку виділення, розтягуємо малюнок до зручного розміру. За допомогою комбінації клавіш *Ctrl+C* та *Ctrl+V* отримуємо три будівлі.

Щоб мати можливість вводити тексти українською мовою, виконуємо команду меню *Global⇒Project Setup*. У вікні, що з'явилося, відкриваємо закладку *Font*. У випадаючому списку вибираємо шрифт *Arial Cyr*.

Двічі клацаючи по підписам під малюнками, змінюємо тексти на «Склад», «Цех», «Лабораторія». В результаті отримуємо картинку, показану на рис. 7.1.


Клацнувши ПКМ по іконці «Цех», вибираємо опцію *Expand* (або через меню – *Objects⇒Expand*). Тим самим створюється вікно «Цех». Аналогічним чином створюємо вікна «Склад» і «Лабораторія».

Переходимо у вікно «Цех». На панелі перегляду компонент відкриваємо *LAN workstation⇒Workstation⇒Generic Devices*. На нижній панелі виділяємо і перетаскуємо *Ethernet workstation* (Робоча станція) у вікно *Building*. Розмножуємо ці робочі станції, під якими створюємо написи «Начальник», «Оператор 1», «Оператор 2».

На панелі перегляду компонент відкриваємо *Switches⇒Workgroup⇒Ethernet⇒Generic Devices*. На нижній панелі виділяємо і перетаскуємо *Ethernet Switch* (Комутатор Ethernet) у вікно «Цех».

На панелі перегляду компонент відкриваємо *LAN servers⇒Generic Devices*. На нижній панелі виділяємо і перетаскуємо *Ethernet Server* (Сервер Ethernet) у вікно «Цех».

Копіюємо (*Ctrl+C* та *Ctrl+V*) яку-небудь робочу станцію у вікна «Склад» і «Лабораторія». Даємо новоствореним станціям назви «Комірник» і «Лаборант» відповідно.

Далі з'єднуємо створені компоненти у мережу. Тиснемо кнопку  на панелі режимів або вибираємо опцію меню *Sites⇒Modes⇒Link*. Підводимо курсор до робочої станції начальника так, щоб стрілка набула зеленого кольору, і клацаємо лівою клавішею миші, потім повторюємо те ж саме з комутатором. З'являється діалогове вікно *Link Assistant*, в якому проводиться подальше конфігурування параметрів з'єднання. Спочатку надається можливість вибрати порти типу Ethernet для пристроїв, що сполучаються, і пов'язати їх, клацнувши по кнопці **Link**. Після цього стає доступною секція вікна *Link Settings*, в якій налаштовуються параметри даного з'єднання:


використовуваний протокол (Ethernet 10Base-T), тип середовища передачі (Twisted Pair – кручена пара), пропускна здатність середовища (100 Мб/с), довжина з'єднання (70 м). Для закінчення тиснемо кнопку **Close**.

Аналогічним чином виконуємо з'єднання комутатора з іншими робочими станціями і з сервером, використовуючи дані з умови задачі.

Далі треба установити зв'язок з АСК ТП. На панелі перегляду компонент вибираємо *Buildings, campuses and LAN workgroups*. З панелі пристроїв перетягуємо у вікно «Цех» зображення *Workgroup* і змінюємо назву на «АСК ТП». З'єднуємо *Ethernet Switch* з *Workgroup*. Для цієї лінії зв'язку протокол *Ethernet 10BASE-F*, середовище *Fiber Optic Cable* (оптоволоконний кабель) і указуємо довжину лінії 500 м.

Після того, як схема складена, необхідно встановити програмне забезпечення на сервері. На панелі перегляду компонент вибираємо *Network and Enterprise software* ⇒ *Server software*. З панелі пристроїв перетягуємо на зображення сервера *Small office database server* і *File server*.

Після установки ПЗ, треба налаштувати додатки та протоколи, які підтримує сервер. Клацнувши ПКМ по зображенню сервера, вибираємо опцію *Configuration*. Відкривається вікно *Ethernet Server configuration*. Виділяємо *Small office database server* і тиснемо кнопку **Plug-in Setup**. Переходимо на закладку *Traffic* і відмічаємо «галочками» необхідні протоколи: *Database client-server*, *SQL*. Повторюємо такі операції для *File server*, вибираючи протокол *File client-server*.

Виконаємо встановлення трафіка між компонентами мережі. Тиснемо кнопку  на панелі режимів або вибираємо опцію меню *Sites* ⇒ *Modes* ⇒ *Set Traffic*. Клацаємо лівою кнопкою миші спочатку на робочу станцію, потім сервер. Після чого відкриється вікно *Profiles*, де необхідно зазначити необхідний трафік (*File server's client*) і натиснути кнопку **Assign**. Аналогічні дії для завдання трафіка потрібно повторити для всіх робочих станцій. Далі встановлюється трафік між робочими станціями *Small office peer-to-peer*. Для зв'язку АСК ТП з сервером цехової мережі вибираємо *InterLAN traffic*.

З використанням меню *Global* ⇒ *Data Flow* відкриваємо вікно, у якому перевіряємо, чи всі необхідні зв'язки встановлені. У цьому ж вікні налаштовуємо параметри трафіків. Виділяємо по черзі трафіки, тиснемо кнопку **Edit**, у новому вікні *Profiles* тиснемо кнопку **Advanced** і указуємо потрібні параметри. Наприклад, для трафіка *File server's client* можна установити:

Transaction Size (розмір транзакції) – *Constant* (постійний розмір), 1 Kbytes;

Time Between Transactions (час між транзакціями) – *Constant*, 0,5 с (визначається рівним одиниці, поділеної на продуктивність АРМ 2 Кбайт/с);

Application Layer Protocol (протокол прикладного рівня) – *File client-server*.

Для трафіка *InterLAN traffic*:

Transaction Size – *Constant*, 512 байт;

Time Between Transactions – *Exponential*, математичне очікування 8, час у мілісекундах;

Application Layer Protocol – *NFS*.

Тепер необхідно налаштувати параметри виведення статистики.

Натисканням ПКМ на іконку «Server» викликаємо меню цього компонента, в якому вибираємо *Statistics*. У вікні *Statistical Items* необхідно відзначити галочкою *Average workload* і *Packets dropped for last seconds* в стовпці, позначеному як «10%» (рис. 7.4).

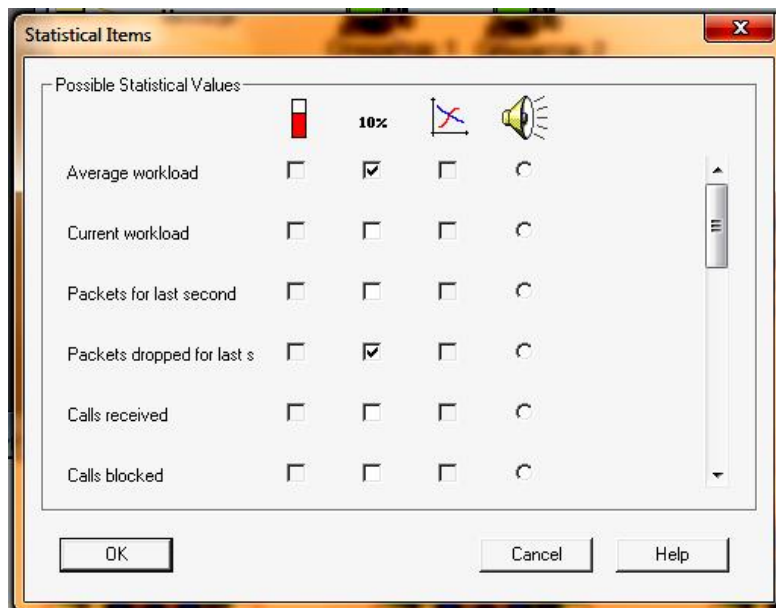




Рис. 7.4

Далі аналогічно налаштуємо виведення статистики для ліній зв'язку. Для найдовших ліній необхідно оцінити час проходження сигналу. Для цього виконуємо команду меню *Global*⇒*Data Flow*, вибираємо необхідний трафік і тиснемо кнопку **Statistics**. У вікні *Statistical Items* відмічаємо галочкою *Travel Time*.

Для введення текстових пояснень вибираємо опцію меню *Sites*⇒*Modes*⇒*Draw* або тиснемо кнопку  на панелі режимів. З'являється панель інструментів малювання, де треба натиснути кнопку **T**. У потрібному місці на складальному полі мишею виділяємо прямокутник, де буде вводиться напис. У вікні *Text Editor* вводимо потрібний текст.

Після успішного виконання вищеописаних кроків можна запустити анімацію роботи створеної моделі командою меню *Control*⇒*Start* або натисканням на кнопку . В результаті в робочому вікні буде відобразитися рух пакетів в рамках заданого трафіка і отримані статистичні характеристики.

Вигляд створеної мережі показаний на рис. 7.5.

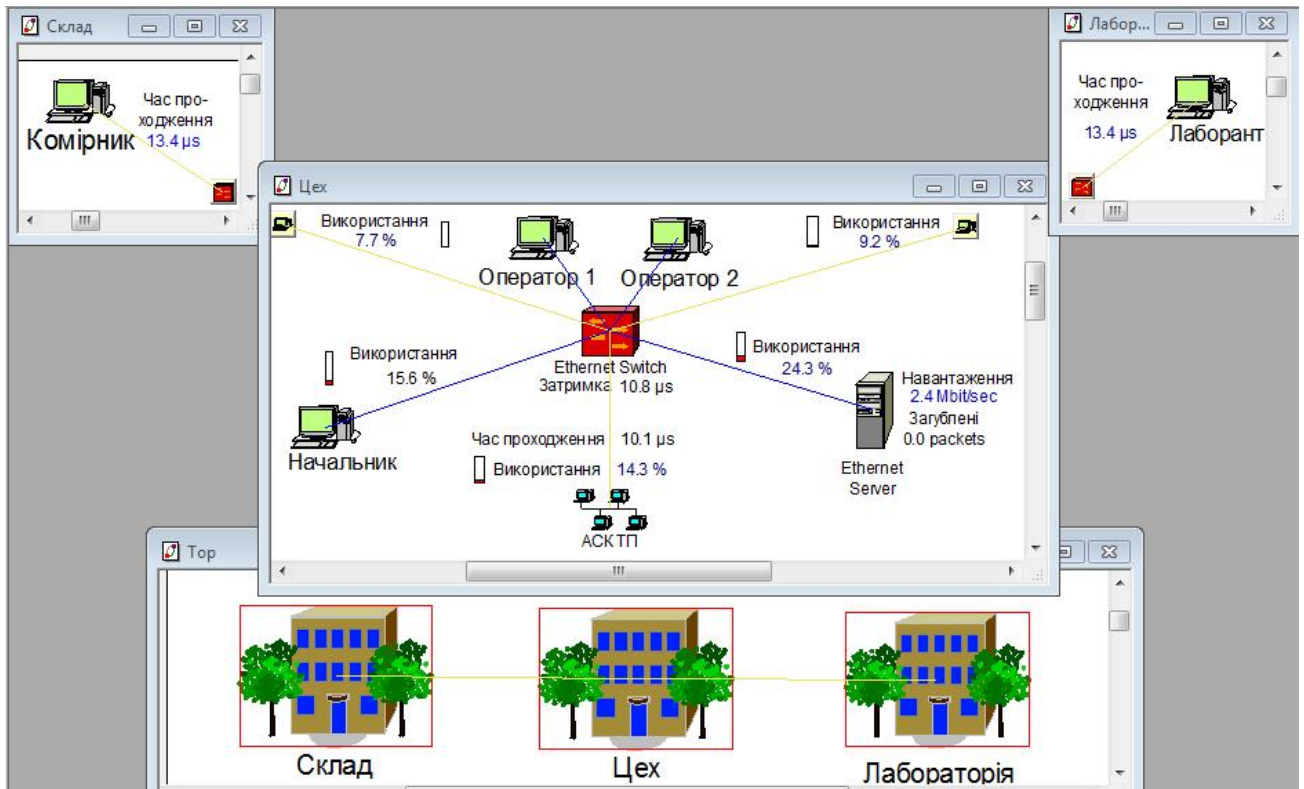


Рис. 7.5

Спроектована система має наступні характеристики. Навантаження на сервер складає 2,4 Мбіт/с. Найбільш навантажена лінія зв'язку використовується на 24,3%. Час проходження імпульсів між найбільш віддаленими абонентами мережі 13,4 мкс. Враховуючи, що у мережі Ethernet швидкість передачі 10 Мбіт/с, бітовий інтервал відповідає часу 0,1 мкс. відповідно час проходження  $13,4/0,1=134$  bt. Подвійний час проходження PDV складає 238 bt, що значно менше допустимого значення 575 bt.

**Задача 7.2.** Виконайте імітаційне моделювання цехової мережі аналогічно до задачі 7.1, узявши числові дані з умов задачі 6.6.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Манко, Г.І. Основи комп'ютерно-інтегрованого управління : Навчальний посібник / Г.І. Манко, О.В. Лещенко. Дніпропетровськ : УДХТУ, 2010. – 304 с.
2. Розрахунки систем контролю та керування : навчальний посібник / Г.І. Манко, Ю.К. Тараненко, О.В. Тітова, В.Я. Трішкін, О.І. Швачка, Л.Д. Чумаков. – Дніпро : УДХТУ, 2018. – 191 с.
3. Бондарев, В.Н. Цифровая обработка сигналов: методы и средства : Уч. пособие для вузов / В.Н. Бондарев, Г. Трёстер, В.С. Чернега. – Х. : Конус, 2001. – 398 с.
4. Основи цифрових систем : Підручник / За ред. М.П. Благодарного, В.С. Харченка. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т, 2002. – 672 с.
5. КОМП'ЮТЕРНІ МЕРЕЖІ [Електронний ресурс]: навч. посіб. / Б. Ю. Жураковський, І.О. Зенів; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 336 с.
6. Задерейко О. В. Комп'ютерні мережі [Електронний ресурс] : навчальний посібник / О. В. Задерейко, Н. І. Логінова, А. А. Толокнов. – Одеса, 2022. – 249 с. – Режим доступу: <https://hdl.handle.net/11300/19423>. – Назва з титул. екрана.
7. Учбово-методичний посібник для виконання лабораторних робіт з дисципліни "Організація комп'ютерних мереж" для студентів напряму 6.050103 Програмна інженерія. Укл. Бабенко М.В., Дніпродзержинськ. ДДТУ, 2015. - 60 с.
8. Основи комп'ютерно-інтегрованого управління та комп'ютерні мережі : методичні вказівки до лабораторних робіт та самостійної роботи студентів для студентів напряму підготовки 6.050202 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / В.І. Бендюг, Б.М. Комариста, О.С. Бондаренко. – К : 2014. – 122 с.
9. Методичні вказівки до самостійної роботи з дисципліни «Проектування та дослідження комп'ютерних систем та мереж» для студентів галузі знань 12 «Інформаційні технології» спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія» / Укл.: О.В. Суботін. – Краматорськ : ДДМА. – 2017. – 32 с.

Навчально-методичне видання

**Манко Геннадій Іванович**

## **ОСНОВИ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОГО УПРАВЛІННЯ**

Навчально-методичні рекомендації  
до практичних занять

В авторській редакції

Комп'ютерна верстка – Тетяна КІЖЛЮ

Експертний висновок склав канд. техн. наук, доц. Антон Шейкус

Зареєстровано НМВ УДУНТ (№ \_\_\_\_ від \_\_.\_\_.20 \_\_)

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 2,44. Обл.-вид. арк. 2,47.

Тираж \_\_\_\_ пр. Зам. № ...

Видавець: Український державний університет науки і технологій  
вул. Лазаряна, 2, ауд. 2216, м. Дніпро, 49010.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:  
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010