

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Ю. О. Сисоєв

**ЕЛЕМЕНТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ
РОБОТИЗОВАНИМ ВИРОБНИЦТВОМ**

Навчальний посібник

Харків «ХАІ» 2022

УДК 658.52.011.56(075.8)
С95

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. С. С. Добротворський,
д-р техн. наук, проф. С. І. Планковський

Сисоєв, Ю. О.

С95 Елементи систем автоматичного керування роботизованим виробництвом [Текст] : навч. посіб. / Ю. О. Сисоєв. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2022. – 136 с.

ISBN 978-966-662-873-5

Викладено основні відомості про елементи систем автоматизації технологічних об'єктів. Описано пристрої отримання інформації (датчики), елементи цифрової електроніки, методи передавання й оброблення інформації про параметри технологічного процесу. Наведено дані про виконавчі пристрої і схеми вмикання електроприводу.

Для студентів вищих технічних закладів, які навчаються за спеціальностями всіх форм навчання, пов'язаними з автоматизацією технологічних процесів.

Іл. 97. Табл. 25. Бібліогр.: 40 назв

УДК 658.52.011.56(075.8)

ISBN 978-966-662-873-5

© Сисоєв Ю. О., 2022
© Національний аерокосмічний
університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», 2022

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

d – кодова відстань
 g – кратність помилки
 $I_{\text{відпуск}}$ – струм відпускання реле
 I_p – робочий струм у котушці реле
 $I_{\text{спр}}$ – струм спрацьовування реле
 k – інформаційні символи
LED (англ. Light-emitting diode) – світлодіод
MEMS – технологія мікроелектромеханічних систем
 n – розрядність коду
 r – перевірні (надлишкові) символи
 $t_{\text{відпуск}}$ – час відпускання реле
 $t_{\text{спр}}$ – час спрацьовування реле
 W – вага кодової комбінації
 x_i – i -та кодова комбінація
АСКВ – автоматизована система керування виробництвом
АСКТП – автоматизована система керування технологічним процесом
АЦП – аналого-цифровий перетворювач
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика
ВАХ – вольт-амперна характеристика
ВВП – вторинний вимірювальний перетворювач
ВМ – виконавчий механізм
ВП – виконавчий пристрій
ДЖ – джерело живлення
ЕД – електричний двигун
ЕЗЛ – емітерно-зв'язана логіка
ЕРС – електрорушійна сила
ЄСКД – єдина система конструкторської документації
ЄСПД – єдина система програмної документації
ЗЗ – зворотний зв'язок
ІМС – інтегральна мікросхема
ККД – коефіцієнт корисної дії
КНС – структура «кремній на сапфірі»
МЗР – молодший значущий розряд
НВП – нормувальний вимірювальний перетворювач
НЗЗ – негативний зворотний зв'язок

ОП – операційний підсилювач
ПВВ – пристрій введення-виведення
ПВП – первинний вимірвальний перетворювач
ПЗ – пояснювальна записка
ПЗЗ – позитивний зворотний зв'язок
ПЗО – пристрій зв'язку з об'єктом
ПЗП – постійний запам'ятовуючий пристрій
ППП – пристрій плавного пуску
 P_a – абсолютний тиск
 $P_{атм}$ – атмосферний тиск
РКІ – рідкокристалічний індикатор
 $P_{кот}$ – потужність, яка споживається обмоткою реле
 $P_{над}$ – надлишковий тиск
САК – система автоматичного керування
СЗР – старший значущий розряд
СК – система керування
ТензоП – тензоперетворювач
ТермоП – термopара
ТКО – температурний коефіцієнт опору
ТО – технологічний об'єкт
ТОМ – термоопір з мідного дроту
ТОП – термоопір з платиного дроту
 $T_{опор}$ – термометр опору
ТП – технологічний процес
ТТЛ – транзисторно-транзисторна логіка
УГП – умовне графічне позначення
ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач
ЧПК – числове програмне керування

ВСТУП

Підвищення продуктивності праці, ефективності та якості виробництва в машинобудуванні неможливе без підвищення рівня автоматизації як виробництва в цілому, так і окремих його систем і пристроїв.

Сучасне виробництво характеризується багатокомпонентністю і широкою номенклатурою виробів. Це приводить до зростання одиничного і дрібносерійного виробництва. Максимальна продуктивність при виготовленні виробів одиничного, дрібно- і середньосерійного виробництва досягається завдяки використанню верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК). При цьому вимоги розвитку машинобудування припускають здійснення поступового переходу від автономно працюючих верстатів з ЧПК до роботизованих технологічних комплексів і гнучких виробничих систем. У зв'язку з цим в машинобудуванні та інших галузях промисловості все більше зростає роль систем автоматичного керування різноманітними технологічними об'єктами. Складовою частиною технологічного об'єкта є промислове обладнання різного рівня складності: металообробний верстат, іонно-плазмова установка, робототехнічний комплекс, автоматична лінія. Об'єднання систем локального керування такого обладнання в єдине ціле на рівні ділянки, цеху, підприємства з метою створення автоматизованої системи керування виробництвом (АСКВ) є необхідною вимогою часу.

Сучасний технологічний об'єкт являє собою органічне поєднання керувальної системи з устаткуванням, що забезпечує виконання власне технологічного процесу: з верстатом – для реалізації процесу різання металів або електрофізичної обробки виробів, з роботом – для завантаження і вивантаження деталей, складання, транспортування, упакування виробів і т. п. Оскільки робота систем керування такого технологічного обладнання відбувається в основному шляхом оброблення інформації, поданої в цифровій (двійковій) формі, вони будуються на базі елементів цифрової електроніки.

Цифрова електроніка нині застосовується практично в будь-якій сфері діяльності людини, починаючи від мобільних телефонів, електронних годинників і холодильників і закінчуючи керуванням безпілотними літаками, ракетами і супутниками. Тому розуміння принципів роботи схем цифрової електроніки і вміння конструювати на базі елементарних схем і пристроїв (логічних елементів, тригерів, компараторів, датчиків, виконавчих механізмів і т. п.), а також систем керування технологічними об'єктами є необхідними складовими частинами знань і умінь сучасного інженера.

1. СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБ'ЄКТА

1.1. Основні положення

Технологічним об'єктом називається сукупність технологічного і електротехнічного обладнання і реалізованого на ньому технологічного процесу виробництва.

Технологічні об'єкти в промисловому виробництві дуже різноманітні. Це може бути як окрема технологічна машина (апарат), агрегат або установка, так і комплекс технологічного обладнання, що реалізують деякий завершений технологічний процес. Необхідними умовами для забезпечення нормального перебігу технологічного процесу є надходження на вхід технологічного об'єкта енергії E , матеріального потоку M (заготовок, інструменту і т. п.) та інформації I (що і як робити) (рис. 1.1).

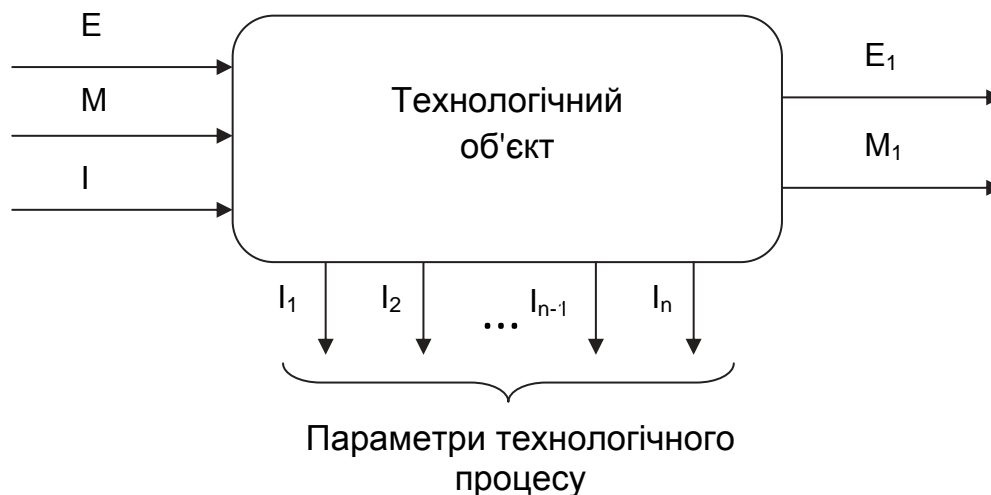


Рис. 1.1. Потoki при реалізації технологічного процесу:

E, E_1 – енергії; M, M_1 – матерії; I, \dots, I_n – інформації:

E, M, I – потоки на вході технологічного об'єкта;

$E_1, M_1, I_1, \dots, I_n$ – потоки на виході технологічного об'єкта

При проходженні технологічного процесу під впливом енергії E , що підводиться, відбувається зміння його параметрів. Для нормального перебігу технологічного процесу необхідно здійснювати контроль за параметрами, що визначають хід процесу, і за необхідності регулювати їх. При виборі параметрів, які необхідно контролювати, слід керуватися тим, що при мінімальній кількості вони давали б найбільш повне уявлення про процес. Параметри, що характеризують технологічний процес, поділяють на сигналізувальні, контрольовані й регульовані.

Сигналізувальні параметри призначені для індикації стану технологічного об'єкта, у першу чергу для інформування про граничні й аварійні ситуації.

Контрольовані параметри забезпечують знання поточних значень фізичних величин, які полегшують пуск, налагодження і ведення технологічного процесу.

Регульовані – параметри, змінення яких може призвести до змінення якості продукції, що випускається.

Контрольовані й регульовані параметри (іноді їх не поділяють) використовуються системою керування і регулювання при відхиленні параметра від номінального (заданого) значення для вмикання виконавчих пристроїв, які керують певними параметрами.

Параметрами можуть бути різні фізичні та хімічні величини, деякі з яких наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Технологічні параметри та одиниці їх вимірювання

Фізична величина (технологічний параметр)	Одиниця вимірювання	Позначення (ГОСТ 21.404-85)
Щільність	кг/м ³	<i>D</i>
Витрата: – масова – об'ємна	кг/с м ³ /с	<i>F</i>
Переміщення, положення, розмір	м	<i>G</i>
Рівень		<i>L</i>
Вологість: – абсолютна – відносна	кг/м ³ %	<i>M</i>
Тиск, розрідження	Па	<i>P</i>
Склад, концентрація	%, Г/л та ін.	<i>Q</i>
Радіоактивність	Бк	<i>R</i>
Швидкість: – лінійна – кутова	м/с рад/с	<i>S</i>
Температура	К	<i>T</i>
В'язкість: – динамічна – кінематична	н·с/м ² м ² /с	<i>V</i>
Маса	кг	<i>W</i>
Час	с	<i>K</i>
Інтенсивність звуку	Вт/м ²	–
Вібрація	Гц та ін.	–
Освітленість	лк	–

1.2. Структурна схема системи автоматизації технологічного об'єкта

Узагальнену структурну схему цифрової системи автоматизації технологічного об'єкта, призначеної для керування заданим параметром, показано на рис. 1.2.



Рис. 1.2. Узагальнена структурна схема системи автоматизації технологічного об'єкта: 1 – сигналізуючі параметри; 2 – контрольовані параметри; 3 – регульовані параметри

Подана система керування працює у такий спосіб. Вимірювання величини контрольованих параметрів проводиться датчиками, основні відомості про які наведено в розд. 2. Різноманіття технологічних параметрів, широкий діапазон їх змінення обумовлює велику кількість застосовуваних видів датчиків.

Оскільки змінення технологічних параметрів зазвичай відбувається безперервно, то і вихідний сигнал більшості датчиків буде безперервним, або аналоговим. Оброблення аналогового сигналу цифровою системою керування потребує попереднього перетворення вихідного сигналу датчика на цифровий. Таке перетворення здійснюється аналого-цифровим перетворювачем (АЦП). Існують різні методи перетворення аналогового сигналу на цифровий, що відрізняються схемними рішеннями, точністю і швидкістю. Принципи дискретизації аналогового сигналу, побудови і роботи АЦП викладено в підрозд. 5.2. Детальніше з ними можна ознайомитися в роботах [1, 2, 17].

З виходу АЦП сигнал у цифровому вигляді (число A у двійковому коді), розрядність n якого визначається необхідною точністю перетворення, надходить на вхід компаратора (пристрою порівняння) системи керування. На другий вхід компаратора з виходу задавального пристрою рівня регульованого технологічного параметра надходить цифровий сигнал тієї ж розрядності (число B у двійковому коді).

Задавальний пристрій рівня регульованого параметра – це пристрій, на виході якого підтримується заданий рівень електричного сигналу, що відповідає необхідному значенню параметра (сигнал B). Співвідношення сигналів A і B залежно від схемного виконання компаратора визначає відповідний логічний рівень одного з його виходів ($A < B$, $A = B$, $A > B$). Отриманий сигнал використовується в подальшому для керування виконавчим пристроєм, який, у свою чергу, керує роботою пристрою регулювання технологічного параметра.

Система керування крім зазначених дій може виконувати й інші функції, наприклад перетворювати вхідний сигнал (A_0, \dots, A_n) для відображення поточного стану технологічного параметра на індикаторах блока індикації і одночасно за допомогою динамічної індикації показувати заданий рівень спрацьовування (сигнал $B_0, B_1 \dots B_n$ з задавального пристрою рівня регульованого параметра) і т. п.

Показана на рис. 1.2 система автоматичного керування є одноконтурною. Під контуром в структурній схемі системи керування розуміють замкнуту ділянку ланцюга, утворену елементами схеми, а також прямими і зворотними зв'язками, що існують в цій схемі. Одноконтурні системи мають лише один зворотний зв'язок, багатоконтурні – кілька прямих і зворотних зв'язків, кожен з яких утворює свій замкнутий контур. Багатоконтурні системи порівняно з одноконтурними мають кращі динамічні властивості, але їх складніше аналізувати й описувати.

За кількістю регульованих параметрів системи автоматичного керування поділяють на одновимірні і багатовимірні.

Одновимірні системи характеризуються одним регульованим параметром, а *багатовимірні* – декількома.

Загальноприйняте схемне зображення системи автоматичного регулювання з одним параметром показано на рис. 1.3. Тут наведено такі позначення: x – задає вплив (необхідна величина параметра); \otimes – суматор; $e = x - y$ – регульовальний сигнал; ПК – пристрій керування; u – керувальне діяння; f – вплив перешкод; ТП – технологічний процес; y – величина регульованого параметра.

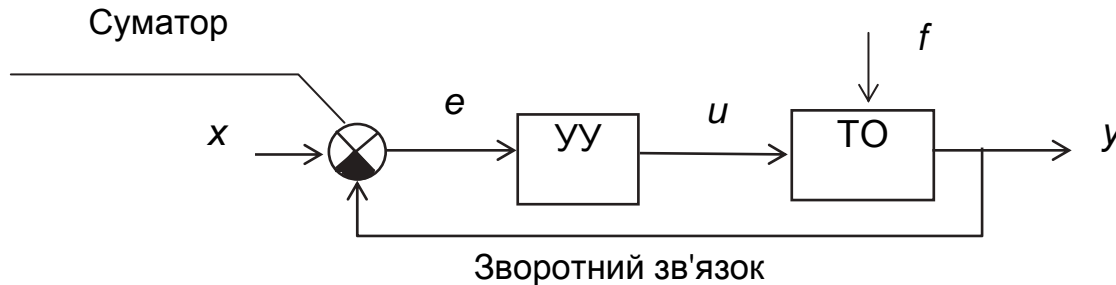


Рис. 1.3. Одноконтурна система автоматичного регулювання

Дія суматора полягає у підсумовуванні сигналів, що надходять до нього. Якщо який-небудь сектор суматора зачорнено, то сигнал, що надходить до нього, береться зі знаком «мінус». Тому в цій схемі суматор можна розглядати як пристрій порівняння (компаратор).

2. ОТРИМАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ПРО ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ ЗА ДОПОМОГОЮ ДАТЧИКІВ

2.1. Загальні відомості про датчики. Основні їх характеристики

Під датчиком розуміють пристрій, що реагує на вимірюваний параметр технологічного процесу і перетворює його на вид (сигнал), зручний для подальшої передачі та використання. У літературі можна зустріти також інші назви таких пристроїв – сенсор, чутливий елемент, вимірювальний перетворювач. Для перетворення інформації до складу датчика можуть входити різні пристрої (рис. 2.1).

Первинний вимірювальний перетворювач (ПВП) призначено для перетворення однієї вимірюваної фізичної величини на іншу, більш зручну для подальшого застосування. Наприклад, при вимірюванні тиску у багатьох приладах він перетворюється на зусилля, що приводить до переміщення мембрани. Вимірюючи її переміщення, можна визначати тиск.

Вторинний вимірювальний перетворювач (ВВП) перетворює фізичну величину, що надходить з виходу ПВП, на електричний сигнал, оскільки він є найбільш зручним для використання з погляду перетворення, передачі і зберігання. Під терміном «електричний сигнал» розуміють такий сигнал, який може бути перетворений з допомогою електронних пристроїв,

наприклад посилений або переданий по лінії зв'язку. Вихідними електричними сигналами датчиків можуть бути напруга, струм або заряд, які характеризуються амплітудою, частотою, фазою, цифровим кодом або величиною заряду. Цей набір характеристик називається форматом вихідного сигналу. Таким чином, кожен датчик характеризується набором вхідних і вихідних параметрів, причому вхідні можуть бути будь-якої фізичної природи, а вихідні зазвичай мають електричний характер.

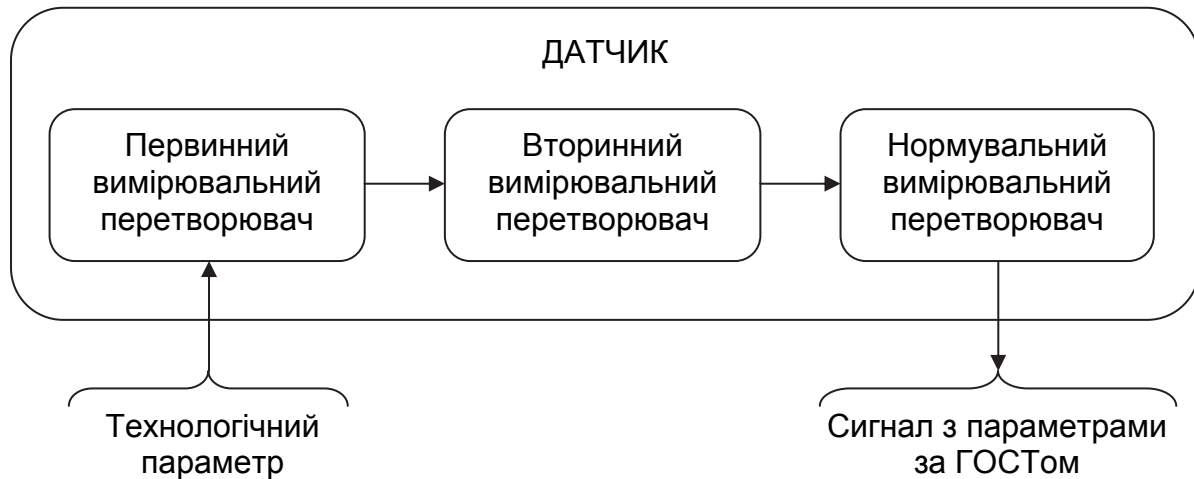


Рис. 2.1. Узагальнена структурна схема датчика

Нормувальний вимірювальний перетворювач (НВП) призначено для перетворення електричного сигналу, що надходить з ВВП, на уніфікований (нормований) електричний сигнал з параметрами, які відповідають вимогам стандартів на засоби вимірювань і автоматизації:

- сили струму: від 0 до 5 мА; від -5 до +5 мА; від 0 до 20 мА; від 4 до 20 мА за ГОСТ 26.011-80;
- напруги: від 0 до 5 В; від -5 до +5 В; від 0 до 10 В; від -10 до +10 В за ГОСТ 26.011-80;
- частоти: початкове значення частоти f_0 (0...8 кГц) і діапазон змінення частоти Δf_{\max} за ГОСТ 26.010-80.

Параметри дискретних (двійкових) сигналів мають відповідати ГОСТ 26.013-81.

На практиці можна зустріти різні модифікації датчиків, в яких з ряду причин можуть бути відсутніми ВВП і НВП. При використанні в системах керування таких датчиків, наприклад для вимірювання температури термомпарами, тиску датчиками серії МРХ фірми Моторола, потрібно підвищувати рівень вихідного електричного сигналу і за необхідності перетворювати його на цифровий.

У сучасних інтелектуальних датчиках вихідний сигнал зазвичай формується цифровим і відповідає певним протоколу та інтерфейсу обміну даними з системою керування (мікропроцесором).

Нижче наведено основні характеристики датчиків.

Статична характеристика – залежність між значеннями величин на виході і вході датчика. На рис. 2.2, а показано такі види статистичних характеристик: 1, 2 – логарифмічні, 3 – S-подібна, 4 – лінійна. Найбільш зручною для використання є лінійна (пропорційна) характеристика (крива 4). Іноді її називають градуовальною і подають у вигляді таблиці, графіка або формули.

Перехідна характеристика – змінення вихідної величини в часі $Y(t)$ при стрибкоподібному зміні входної величини X (рис. 2.2, б). Ця характеристика визначає динамічні (частотні) параметри датчика. Чим менше час встановлення $t_{вст}$ вихідного сигналу Y після зміння входного X (див. рис. 2.2, б), тим на більш високих частотах може працювати датчик.

Чутливість датчика K – це відношення малого збільшення вихідного сигналу ΔY до відповідного збільшення входної величини ΔX (див. рис. 2.2, а):

$$K = \Delta Y / \Delta X.$$

Діапазон вимірювань – область значень вимірюваної величини, для якої нормовано допустимі похибки датчика.

Межа вимірювань – найбільше та найменше значення діапазону вимірювань.

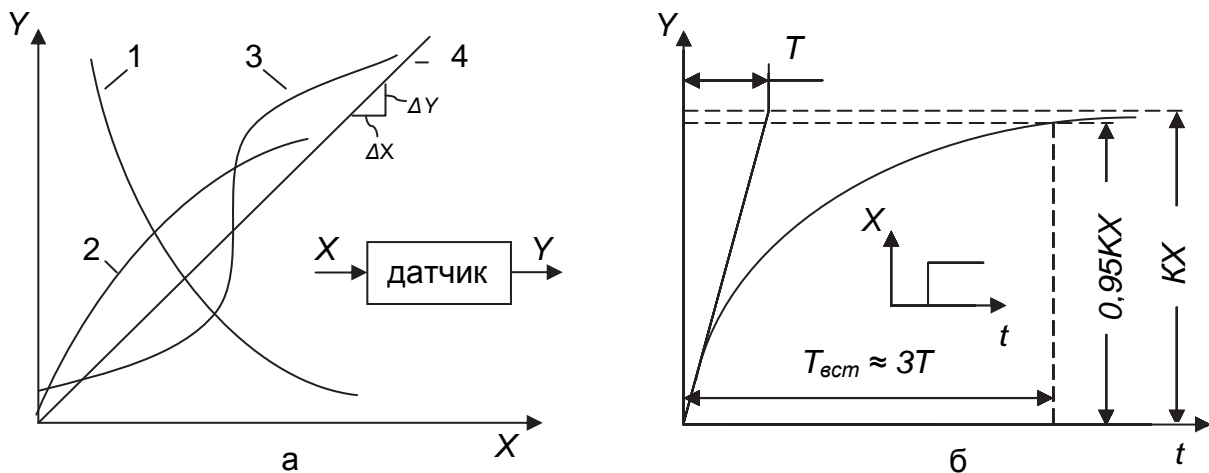


Рис. 2.2. Характеристики датчиків:
 а – статичні характеристики; б – перехідна характеристика;
 X – входна вимірювана величина; Y – вихідний сигнал;
 K – чутливість датчика; T – стала датчика

Вимірювання повинні мати властивості збіжності і відтворюваності.

Збіжність – це якість вимірювань, що відбиває близькість результатів вимірювань одного і того ж параметра, виконаних повторно одними і тими ж засобами і одним і тим же методом в однакових умовах.

Відтворюваність – це якість вимірювань, що відбиває близькість один до одного результатів вимірювань, які виконуються в різних умовах (в різний час, в різних місцях, різними методами і засобами).

Будь-які вимірювання, виконані із застосуванням датчиків, мають похибки. Похибки можуть бути:

- випадковими, які мають випадкову природу і причина їх невідома;
- систематичними, які обумовлені недосконалістю методів визначення і конструкції приладу.

Розрізняють такі види похибок вимірювання:

- абсолютна – похибка вимірювання, виражена в одиницях вимірюваної величини:

$$\Delta X = X - X_0,$$

де ΔX – абсолютна похибка вимірювання;

X – виміряне значення параметра;

X_0 – істинне значення;

- відносна – відношення абсолютної похибки вимірювання до істинного значення вимірюваної величини. Відносна похибка виражається у відносних одиницях:

$$\gamma = \Delta X / X_0,$$

або у відсотках:

$$\gamma = \Delta X / X_0 \cdot 100 \% ;$$

- зведена, що визначається як

$$X_{звед} = [\Delta X / (X_{max} - X_{min})] 100 \% ,$$

де X_{min} і X_{max} – мінімальне і максимальне значення вимірюваної величини.

Класом точності приладу називається максимальна зведена похибка

$$\gamma_{мзп} = [\Delta X_{max} / (X_{max} - X_{min})] 100 \% .$$

Залежно від класу точності прилади поділяють на зразкові й робочі. Зразкові міри і прилади призначені для перевірки за ними робочих засобів вимірювань, робочі заходи та прилади – для практичних вимірювань.

2.2. Класифікація датчиків

Первинні перетворювачі (зазвичай це чутливий елемент датчика) за наявності або відсутності допоміжного джерела енергії поділяють на два великих класи – генераторні і параметричні перетворювачі.

Генераторні датчики перетворюють різні види енергії вимірюваних фізичних параметрів на електричну, тобто вони генерують електричну енергію. До них належать термоелектричні, п'єзоелектричні, фотоелектричні, гальванічні та деякі інші датчики.

Параметричним датчикам для роботи необхідне джерело енергії. Представниками цієї групи є реостатні (потенціометричні) датчики, тензодатчики і т. п.

Окрему групу становлять механічні первинні перетворювачі, на виході яких формується сигнал у вигляді зусилля, що розвивається чутливим елементом під дією вимірюваної фізичної величини. До таких датчиків належать мембранні манометри, ротаметри та ін.

Класифікацію датчиків за видом вимірюваного параметра, вихідним сигналом, реалізацією обміну даними з системою керування показано на рис. 2.3.

За вихідним сигналом розрізняють такі датчики:

- з аналоговим вихідним сигналом;
- з цифровим вихідним сигналом;
- з імпульсним вихідним сигналом;
- з дискретним вихідним сигналом.

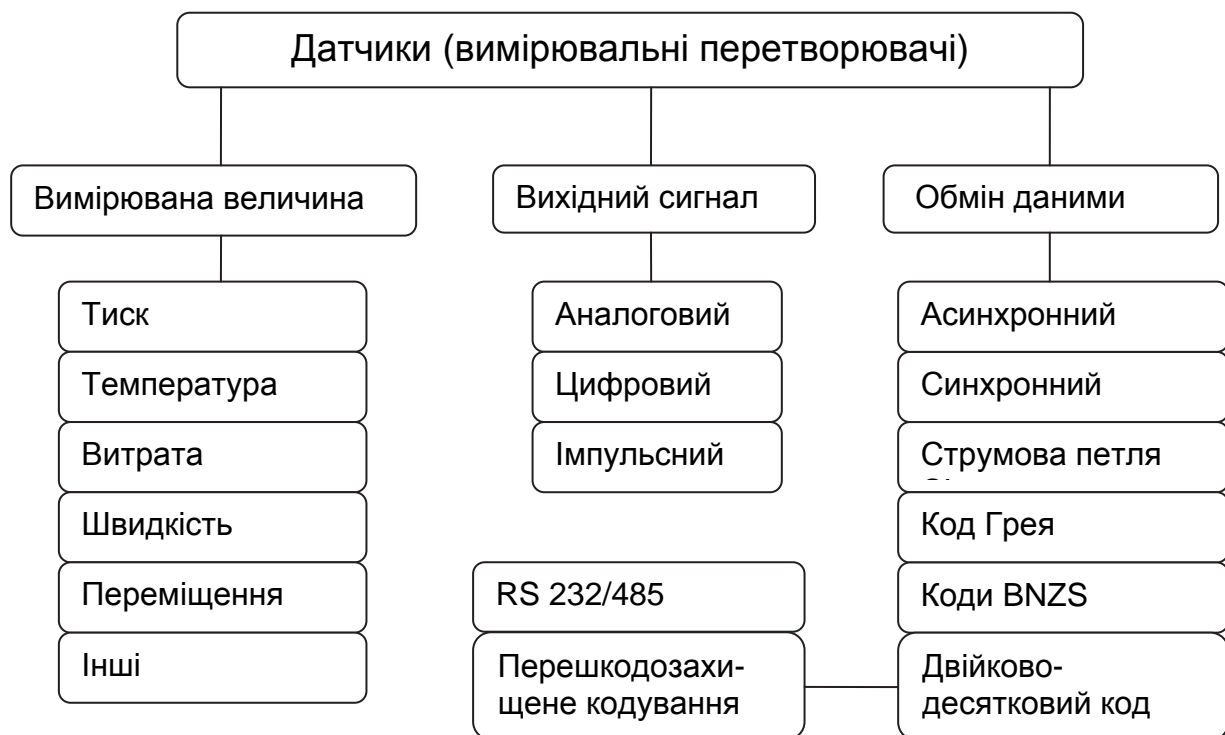


Рис. 2.3. Спрощена класифікація датчиків

Аналоговий сигнал (рис. 2.4, а) – це сигнал, що безперервно змінюється в часі. Зазвичай фізичні параметри змінюються безперервно в часі, тобто є аналоговими, тому чутливі елементи багатьох датчиків мають аналоговий вихід.

Цифровий сигнал (рис. 2.4, б) – це закодований за певним законом сигнал, що несе інформацію про стан вимірюваного фізичного параметра. Найбільшого поширення набули двійкові коди – простий двійковий, двійково-десятковий, код Грея та ін. При кодуванні сигналу додатково можуть надаватися певні властивості – перешкодозахищеність (наприклад, застосуванням коду Хеммінга, циклічних кодів), економічність (наприклад, використанням коду Шеннона – Фено) і деякі інші.

Імпульсний вихідний сигнал датчика (рис. 2.4, в) являє собою імпульси постійного струму або імпульси використуваної вхідної напруги живлення, яка може бути від 8 до 28 В постійного струму. Такі сенсори в різних технологіях використовуються для дистанційного моніторингу витрати і підсумовування потоку за допомогою лічильників.

Дискретний вихідний сигнал (рис. 2.4, г) характеризує одне з двох можливих станів об'єкта – «0» і «1», «Увімкнено» – «Вимкнено», «Відкрито» – «Закрито» і т. п. Такий сигнал мають датчики положення – кінцеві вимикачі і релейні датчики (геркони і мікроперемикачі).

Розвиток інтегральної схемотехніки дозволив вбудовувати в корпус вимірювального перетворювача мікропроцесор, що привело до створення принципово нових пристроїв – інтелектуальних датчиків.

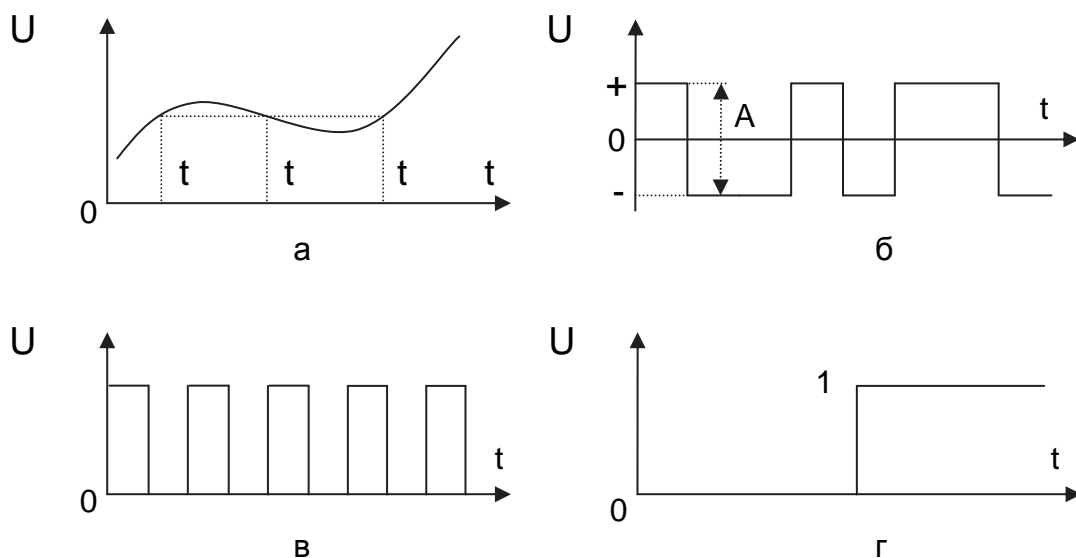


Рис. 2.4. Вихідні сигнали датчиків

Інтелектуальний датчик – це датчик, який може автоматично адаптуватися до джерела сигналу і навколишнього середовища, коригувати помилки вимірювань, функції самоконтролю і засоби двостороннього обміну інформацією з системою керування.

У сучасних інформаційно-вимірювальних системах усе більшу частку займають саме інтелектуальні датчики. Детальніше з пристроєм і принципом дії цих та інших датчиків можна ознайомитися в роботах [3, 4].

3. ДАТЧИКИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ

Інформація про переміщення фізичних об'єктів і їх складових частин є необхідною практично в будь-якій сфері людської діяльності. Датчики для вимірювання переміщень застосовуються в усіх АСКТП, без них не може обійтися жодна роботизована система, жодна система керування транспортними потоками. Різноманіття областей застосування обумовлює широкий спектр датчиків переміщень, що випускаються промисловістю, в основі роботи яких лежать електричні (змінення опору, ємності, індуктивності), магнітні, оптичні та інші фізичні явища. Загальну характеристику різних датчиків переміщення подано в табл. 3.1.

3.1. Потенціометричні датчики

Унаслідок простоти конструкції як датчики переміщення значного поширення набули потенціометричні датчики.

Потенціометричний датчик – це датчик опору, підключений в електричний ланцюг подільником напруги. Деякі типи потенціометричних датчиків показано на рис. 3.1.

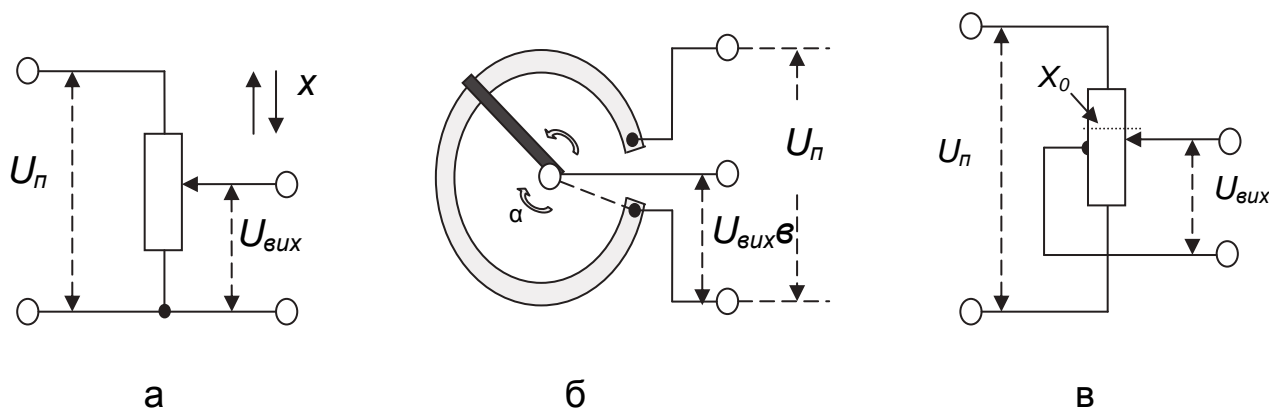


Рис. 3.1. Потенціометричні датчики і схеми їх підключення для вимірювання переміщення: а, в – лінійного; б – кутового

Виготовлення каркасів із заданим функціональним законом змінення опору дозволяє отримувати вихідний сигнал $U_{вих} = F(x)$ практично будь-якого виду як при лінійному (рис. 3.1, а), так і кутовому (рис. 3.1, б) переміщеннях. У системах керування часто застосовують двотактні датчики, здатні фіксувати величину і напрямок переміщення. Одну з можливих конструкцій двотактного датчика показано на рис. 3.1, в. При змінній напрузі переміщення x , тобто при проходженні значення $x = x_0$, змінюється полярність вихідної напруги, а при живленні змінною напругою – фаза.

Таблиця 3.1

Порівняльна характеристика датчиків переміщення

Вимоги до процесу вимірювання	Тип датчика									
	Потенціометричний		Індуктивний LVDT	Інкрементний		Абсолютний				
	Дротяний	Провідний пластик		Оптоелектричний	Магнітно-резистивний	Оптоелектричний	Магнітно-резистивний			
Точність (розділення)	НР	НР, ВР	ВР, НР	ДВР, ВР, НР	ДВР, ВР, НР	ДВР, ВР, НР	ДВР, ВР, НР	ДВР, ВР, НР	ДВР, ВР, НР	НР
Швидкість процесу більше 5 м/с	-	+,-	+	+,-	-	-	+	+	+	-
Малі розміри	+	+	-	+,-	+,-	+,-	+	+	+	+,-
Клас захисту (IP65)	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+,-
Робота в електромагнітному полі	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-
Потрібна цифрова обробка	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-
Робота в умовах вібрації	-	+,-	+	+	+	+	+	+	+	+
Вартість	Н	Н	С	В	Н, С, В	В	В	В	В	С

Примітка. НР – низьке розділення; ВР – високе розділення; ДВР – дуже високе розділення; Н – низька; С – середня; В – висока; «+» – цей параметр присутній; «-» – цей параметр відсутній; «+,-» – в окремих моделях цей параметр присутній.

Потенціометричні датчики виготовляють з тонкого дроту з високим питомим опором (матеріали – ніхром, константан, манганін та ін.), намотаного на діелектричний каркас. Застосовуються також датчики із суцільним провідним покриттям. Основні параметри датчиків кутового переміщення наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Характеристики датчиків кутового переміщення

Характеристика	Тип потенціометричного датчика				
	ПД	ПП	ПК	П-1	П-63
Робочий діапазон, град	320	320	Не обмежено	± 27	± 10
Крутість, В/град	0,08	0,08	0,1	2,5	1,5
Напруга живлення, В	30	30	–	30	30
Ступінчастість, виток/град	1...3	1...3	2,6	–	6
Опір, Ом	1000	4000	1600	–	–

Роздільна здатність датчиків визначається діаметром дроту: від 0,03 до 0,1 мм у прецизійних датчиках і до 0,4 мм у більш грубих датчиках. У потенціометричних датчиках із суцільним провідним покриттям при досить великому опорі практично відсутня помилка ступінчастості.

Сучасні датчики можуть вимірювати величину переміщення до декількох метрів з високою точністю. Для прикладу нижче наведено технічні характеристики (табл. 3.3), габаритні і настановні розміри (рис. 3.2) деяких аналогових датчиків переміщення MLO-POT фірми FESTO з робочим ходом 225...2000 мм.

Переваги потенціометричних датчиків переміщення:

- простота конструкції;
- можливість отримання лінійної статичної характеристики;
- стабільність характеристик;
- можливість роботи на постійному і змінному струмі.

До основних недоліків належать:

- можливість відмови через наявність ковзного контакту і внаслідок окиснення контактної доріжки, перетирання і відгинання повзунка;
- порівняно невелика чутливість, що обмежує можливість їх застосування при малих переміщеннях.

Крім того, такі датчики мають внутрішнє тертя, що впливає на його точність і є причиною шумів і зношення. Це призводить до погіршення ха-

рактик (лінійності, точності) і обмежує ресурс датчика. На функціонування потенціометричних датчиків помітно впливає навколишнє середовище (вологість, пил, температура).

Таблиця 3.3

Технічні характеристики датчиків MLO-POT

Хід ¹⁾ , мм	225	300	360	500	600	1000	1500	2000
Конструкція	Безштокові із захисною стрічкою і ковзним повзунком							
Принцип вимірювання	Аналоговий датчик переміщення, контактний, абсолютне вимірювання							
Розділення, мм	0,01							
Максимальна швидкість переміщення, м/с	10							
Максимальне прискорення, м/с ²	200							
Положення монтажу	Будь-яке							
Живлення від джерела постійного струму, В	10							
Струм скребка (рекомендований, μ А)	Менше 1							
Інтерфейс	Аналоговий							
Строк служби (повних ходів, $\times 10^6$)	Зазвичай 100							
Приєднання	4-контактний штекер, тип А DIN 43 650							
Вага, кг	0,9	1,0	0,11	0,13	0,15	2,20	3,0	3,9
Примітка ¹⁾ . Існують датчики з ходом 450, 750, 1250, 1750 мм								

Засобами боротьби із зазначеними факторами є:

- новітні резистивні покриття на основі провідних пластиків;
- фоторезистивні покриття;
- магнітозалежні резистори (для безконтактного зчитування положення);
- вбудовані в резистор редуктори (для поліпшення розділення).

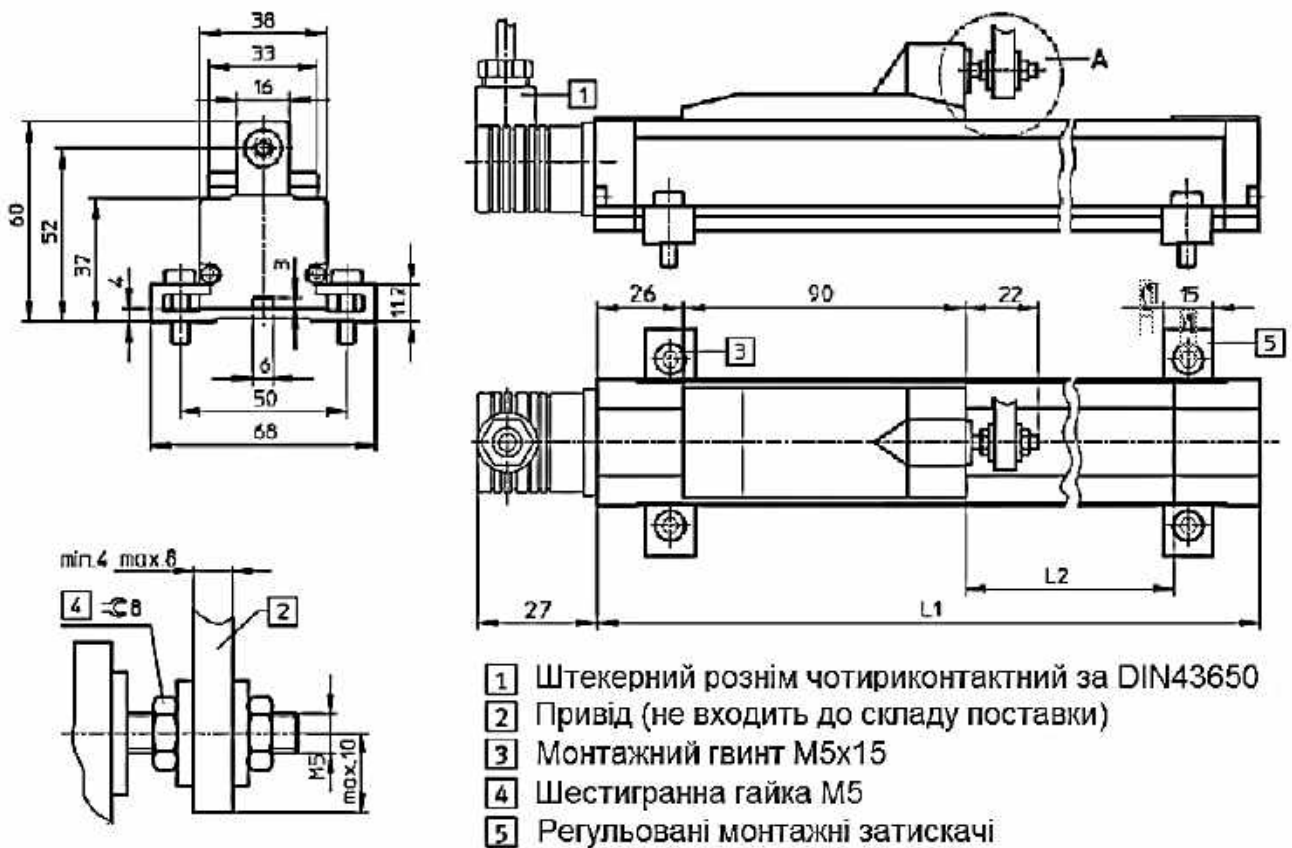


Рис. 3.2. Габаритні й установлювальні розміри датчиків переміщення MLO-POT фірми FESTO

Більшість датчиків переміщень має невисоку швидкодію, тому їх вважають статичними пристроями. Виробники датчиків зазвичай заносять до документації величину максимальної швидкості переміщення (див. табл. 3.3).

Потенціометричний датчик переміщення часто є складовою частиною більш складних датчиків, для яких визначення величини переміщення є одним з декількох ступенів процесу перетворення сигналу. Приклади таких складових перетворювачів показано на рис. 3.3 і 3.4.

На рис. 3.3 зображено схему датчика тиску, що застосовується в авіації (датчик авіоніки). Змінення тиску в ньому приводить до переміщення штока 3, який через механічну передачу змінює положення щіткотримача 7 і відповідно вихідний сигнал потенціометричного датчика.

На рис. 3.4 показано схему поплавкового вимірювача рівня рідини, який широко використовується в транспортних засобах для контролю кількості (рівня) палива в баку. В цьому випадку поплавок 4, жорстко зв'язаний важелем 7 з повзунком 3 потенціометра 2, забезпечує переміщення повзунка. При цьому відбувається змінення вихідного сигналу датчика.

Значного поширення в робототехніці набули потенціометричні датчики кутового переміщення – багатооборотні спіральні потенціометри з ма-

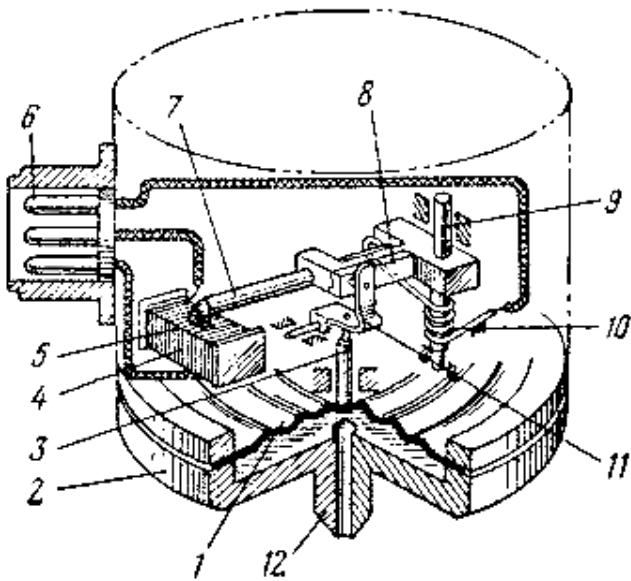


Рис. 3.3. Датчик тиску:

- 1 – мембрана; 2 – основа; 3 – шток;
- 4 – потенціометр; 5 – щітка; 6 – рознім;
- 7 – щіткотримач; 8 – плоский важіль;
- 9 – вісь; 10 – пружина; 11 – кулачок;
- 12 – підвідний штуцер

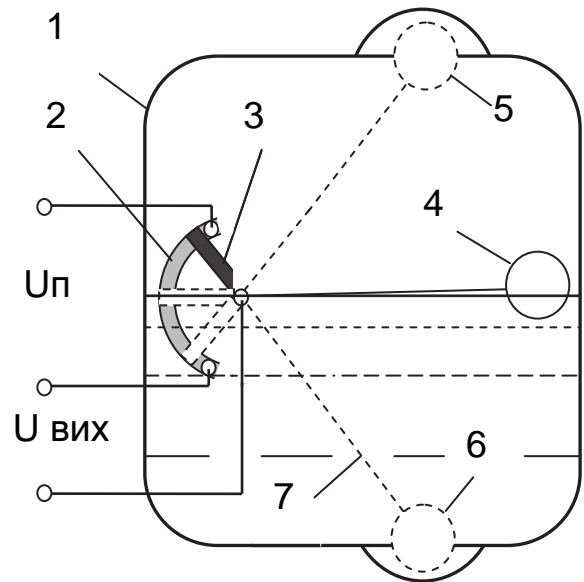


Рис. 3.4. Датчик рівня палива:

- 1 – бак з рідиною; 2 – потенціометр;
- 3 – повзунок; 4 – поплавок («1/2 бака»);
- 5 – поплавок у верхньому положенні («П» – бак повний);
- 6 – поплавок у нижньому положенні («0» – бак порожній);
- 7 – важіль

лими габаритними розмірами і високою роздільною здатністю. Похибка прецизійних потенціометрів такого типу досягає значень 0,01...0,05 %, а роздільна здатність – до 0,01 %.

3.2. Оптикоелектричні датчики переміщень

У сучасних системах ЧПК, автоматизованих системах керування і робототехнічних системах для визначення величини переміщення і положення контрольованого об'єкта значного поширення набули фотоелектричні датчики кутових і лінійних переміщень з цифровим вихідним сигналом, що є зручним для застосування в мікропроцесорних системах керування. Крім того, вони характеризуються високою точністю вимірювання в широкому спектрі експлуатаційних умов. Ці датчики належать до класу оптоелектронних пристроїв. У них в єдиному корпусі розміщені: прецизійна оптична система, фотоелементи та цифрові інтегральні схеми.

Датчики перетворення механічних переміщень на цифровий код за видом перетворення можна поділити на такі:

- датчики, що працюють за принципом безперервного лічення;
- безпосереднього подання;
- з проміжним перетворенням на часовий інтервал (цей вид застосовується рідко і тому розглядатися не буде).

У першій групі датчиків кожному фіксованому збільшенню (дискреті) безперервного параметра (переміщення) ставиться у відповідність одиниця цифрового коду. Потім загальна кількість одиниць при переміщенні від початкового значення x_1 до кінцевого x_2 підраховується. Отримане значення є цифровим еквівалентом переміщення, точніше, його збільшення $x_2 - x_1$. Таким чином, перетворюється тільки збільшення параметра, а не абсолютне його значення, причому значенням x_1 ставиться у відповідність цифровий код нуля. Принцип роботи датчиків безперервного лічення показано на рис. 3.5 і 3.6.

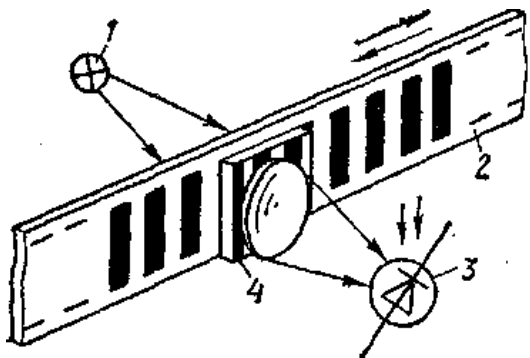


Рис. 3.5. Датчик безперервного лічення, що вимірює лінійне переміщення: 1 – джерело світла; 2 – вимірювальний растр; 3 – фотоприймач; 4 – індикаторний растр

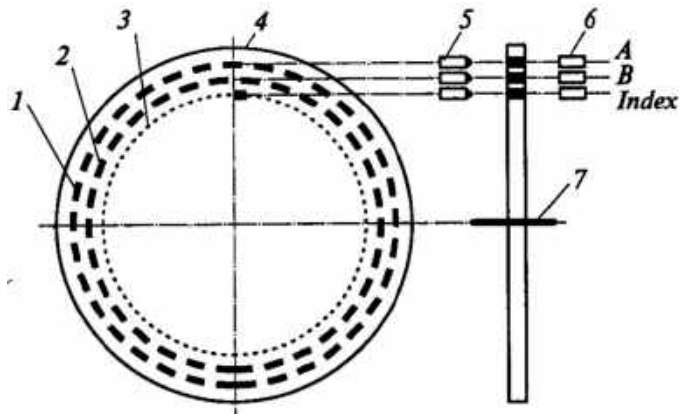


Рис. 3.6. Шифратор збільшень: 1 – доріжка А; 2 – доріжка В; 3 – індексна доріжка; 4 – кодувальний диск; 5 – джерела світла; 6 – фотоприймачі; 7 – вісь обертання

За прийнятою термінологією такі датчики називаються інкрементними (рідше – шифратори збільшень), а для датчиків кутового переміщення застосовується ще термін «енкодер».

Такі перетворювачі прості, проте мають суттєвий недолік: можливий перебіг при підрахунку і зникнення одиниць призводять до появи помилки, пропорційній кількості перебоїв, тобто до помилки, що накопичується. Цей недолік усувається в інкрементному датчику шляхом збільшення кількості кодувальних доріжок. Роботу датчиків переміщення безпосереднього лічення розглянемо на прикладі шифратора збільшень, показаного на рис. 3.6.

Кутове переміщення контрольованого об'єкта за допомогою гнучкої муфти передається на вал шифратора збільшень. У корпусі датчика на валу кріпиться прозорий кодувальний диск зі скла або пластику, на доріжках якого нанесені непрозорі мітки. Залежно від кількості доріжок датчики поділяють на три типи:

- одноканальні шифратори збільшень – одна доріжка (А);
- пріоритетні шифратори – дві доріжки (А і В);

– пріоритетні шифратори з підрахунком кількості обертів – три доріжки (А, В та індексна доріжка З).

Кількість міток на доріжках А і В завжди однакова, мітки на них розміщені по колу рівномірно, але зі зміщенням на чверть періоду по колу. На третій (індексній) доріжці завжди тільки одна мітка, яка фіксує точку відліку. Зчитування міток і отримання відповідних логічних сигналів у датчику здійснюється оптоелектронним способом, при якому доріжки просвічуються, а сигнали з фотоприймачів посилюються і формуються до стандартних логічних рівнів. При обертанні диска світлові потоки від джерел періодично перекриваються непрозорими мітками, що приводить до появи імпульсних сигналів на виходах А, В і Index датчика.

Кількість міток, розташованих на доріжках А і В, визначає роздільну здатність датчика. Сучасні технології нанесення міток і виготовлення напівпровідникових фотоприймачів дозволяють розпізнавати мітки розміром у декілька мікрон. При діаметрі диска у кілька сантиметрів досягається роздільна здатність до 10 000 міток за один оберт.

Одноканальні шифратори збільшень при обертанні в будь-якому напрямку формують на виході датчика періодичну імпульсну послідовність (сигнал А на рис. 3.7, а). Частота проходження імпульсів F , Гц, на виході такого шифратора визначається швидкістю обертання диска n , об/с, і роздільною здатністю датчика k (кількість міток за один оберт):

$$F = nk .$$

При русі в одному напрямку простий підрахунок імпульсів на виході датчика дозволяє оцінити кутове переміщення вала датчика φ , радіан, з моменту початку спостереження:

$$\varphi = 2\pi N / k ,$$

де N – кількість підрахованих лічильником імпульсів.

Якщо ж час підрахунку обмежити деяким фіксованим інтервалом T , то за показниками лічильника можна оцінити кутову швидкість обертання вала

$$n = N / (Tk) .$$

Визначити напрямок обертання одноканальні шифратори збільшень не можуть. При цьому змінення напрямку обертання датчика під час руху обов'язково призведе до появи помилки при спробах оцінити швидкість і переміщення за наведеними вище формулами. Крім того, використовуючи такий шифратор при зупинці механізму, можна спостерігати явище позиційного тремтіння, яке полягає в тому, що при зупинці оптичного диска на

межі мітки у результаті впливу вібраційних коливань мітка буде періодично перекривати світловий потік, а на виході датчика з'являться помилкові імпульси.

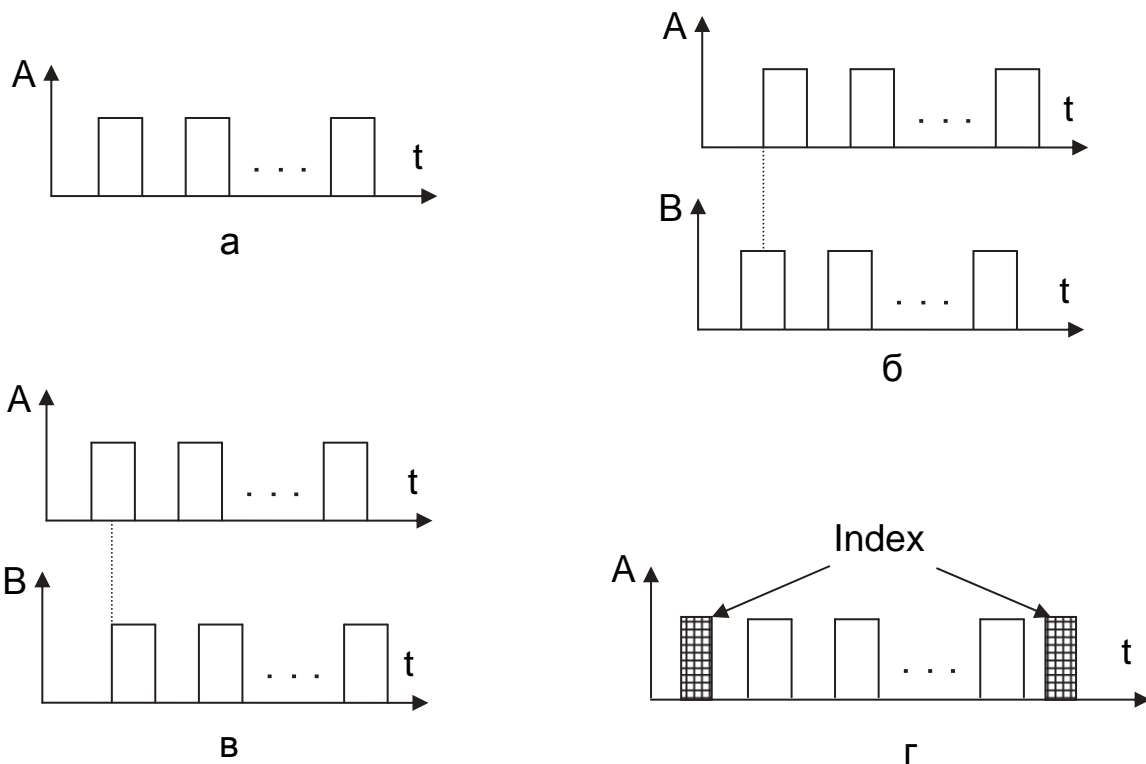


Рис. 3.7. Вихідні сигнали датчиків збільшень:

а – одноканального шифратора збільшень; б – двоканального шифратора при його обертанні за годинниковою стрілкою; в – двоканального шифратора при його обертанні проти годинникової стрілки; г – пріоритетного шифратора з підрахунком кількості обертів

Уведення другої доріжки B, на якій мітки зміщені на чверть періоду відносно доріжки A, дозволяє отримати двоканальний шифратор (рис. 3.7, б), логічна обробка сигналів A і B якого дає можливість визначати напрямок руху.

При роботі двоканального шифратора при рівномірному обертанні диска формуються два квадратурних сигнали A і B – дві періодичні імпульсні послідовності, зміщені на 90° (рис. 3.8, а). При обертанні диска за годинниковою стрілкою (вперед) сигнал A відстає від сигналу B (див. рис. 3.7, б), а при обертанні диска проти годинникової стрілки (назад) сигнал A випереджає сигнал B (див. рис. 3.7, в). Для визначення напрямку можна, наприклад, фіксувати стан сигналу B по фронту сигналу A. Тоді при обертанні за годинниковою стрілкою $B = 1$, а проти годинникової стрілки – $B = 0$.

Це завдання порівняно просто вирішує D-тригер, на вхід синхронізації якого подається сигнал A, а на D-вхід – сигнал B (рис. 3.8, б). При обер-

танні за годинниковою стрілкою (вперед) на виході тригера встановлюється сигнал знака $Sign = 1$, а при обертанні проти годинникової стрілки (назад) – $Sign = 0$.

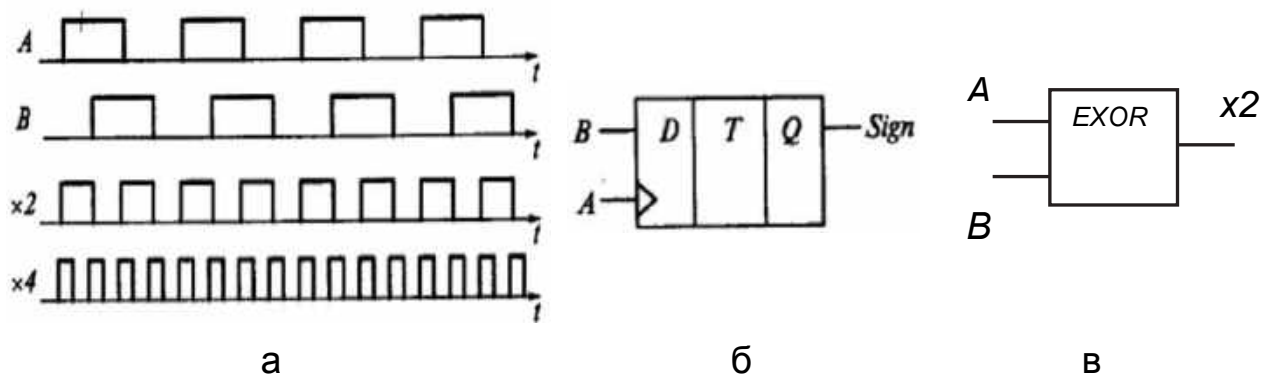


Рис. 3.8. Вихідні сигнали двоканального шифратора:
 а – часові діаграми сигналів A , B , $x2$ і $x4$; б – визначення напрямку переміщення за допомогою D -тригера; в – отримувати сигнал $x2$ можливо за допомогою елемента Виключне Або

Квадратурні сигнали дозволяють підвищити роздільну здатність датчика в два і навіть чотири рази. Для підвищення роздільної здатності в два рази над сигналами A і B виконують операцію Виключне Або (див. рис. 3.8, а, в). Сигнал $x2$, отриманий у результаті такої операції, має частоту в два рази більшу, ніж кожен з сигналів A і B . Для підвищення роздільної здатності в чотири рази формуються імпульси по передньому і задньому фронтах сигналу $x2$. Сигнал $x4$, отриманий при такому перетворенні, має частоту в чотири рази більшу, ніж вихідні сигнали A і B .

У сучасних датчиках для підвищення перешкодостійкості для визначення напрямку обертання часто використовують не фронти, а змінення логічних станів квадратурних сигналів. Опитування сигналів проводиться постійно. Якщо буде виявлено змінення стану одного з сигналів, то знак визначається як логічна функція від чотирьох змінних: A і B – початковий стан сигналів (до змінення), A^* і B^* – новий стан сигналів (після змінення). Логічну функцію можна описати за допомогою табл. 3.4, яку складено відповідно до діаграм, зображених на рис. 3.7, б і в.

Триканальні шифратори збільшень на додаток до квадратурних сигналів A і B формують за один оберт вала один імпульс I (Index), який зазвичай беруть за початок відліку і використовують для скидання лічильника при вимірюванні кутового переміщення. У результаті цього показання лічильника відповідають куту повороту вала відносно певного початкового положення, а загальне переміщення визначають з урахуванням кількості підрахованих імпульсів Index.

Таблиця 3.4

Таблиця переходів для визначення напрямку обертання двоканального шифратора збільшень

A * і B * (новий стан)	A та B (вихідний стан)	Sign (напрямок обертання)	A * і B * (новий стан)	A та B (початковий стан)	Sign (напрямок обертання)
10	00	Назад	11	10	Назад
01	00	Вперед	00	10	Вперед
00	01	Назад	01	11	Назад
11	01	Вперед	10	11	Вперед

Для оброблення сигналів квадратурних датчиків застосовують спеціалізовані мікросхеми. Стан вихідного сигналу однієї з таких мікросхем (LS7082), що випускається фірмою LSI Computer Systems, який визначається станом керувальних входів, подано в табл. 3.5.

Таблиця 3.5

Режими роботи мікросхеми LS7082

Умовне графічне позначення	Стан входів		Вихідний сигнал
	x2	x4x1	
	1	1	x4
	1	0	x1
	0	0	x2
	0	0	x2

Входи A, B і INDX мікросхеми приєднуються до виходів триканального шифратора збільшень. За допомогою входів x2 і x4x1 за табл. 3.5 задається один з трьох можливих режимів роботи мікросхеми.

До контакту RBIAS мікросхеми підключається резистор настроювання тривалості вихідних імпульсів у режимі x4.

При русі вперед мікросхема формує послідовність імпульсів UPCK, при русі назад – послідовність імпульсів DNCK. Індексний вихідний сигнал мікросхеми INDX синхронізовано з лічильними імпульсами і може бути використаний для початкового установалення лічильників. Виходи мікросхеми можуть безпосередньо підключатися до входів реверсивного лічильника стандартної логіки.

Вихідні сигнали шифраторів збільшень зазвичай мають рівні стандартної TTL-логіки. Іноді для підвищення здатності навантаження і передачі сигналів на відстань більше 1 м виходи виконуються з відкритим колектором або як двотактні вихідні каскади з підвищеною здатністю навантаження.

Для вимірювання лінійного переміщення і лінійної швидкості руху можна використовувати розглянуті шифратори збільшень, конструктивно доповнені перетворювачами лінійного переміщення на кутове. При відомому діаметрі мірного диска D лінійну швидкість v обчислюють за кутовою швидкістю:

$$v = \pi D n,$$

де n – кутова швидкість, об/с.

У табл. 3.6 наведено паспортні дані деяких шифраторів збільшень фірми Pererl + Fuchs.

Таблиця 3.6

Характеристики шифраторів збільшень фірми Pererl + Fuchs

Параметри	Серія датчиків					
	10	14	20	30	58	60
Максимальна швидкість обертання, об/хв	6 000	6 000	3 000	6000	12000	6000
Максимальна роздільна здатність, кількість міток за оберт, для пластикового/скляного диска	1500/ 5000	1500/ 5000	2500/ –	1500/ 5000	1500/ 5000	1250/ –
Кількість каналів	1/2/3	2/3	1/2/3	1/2/3	3	1/2/3
Вид вихідного сигналу/інтерфейсу	TTL/ RS422	TTL/ RS422	TTL/ RS422	TTL/ RS422	–/ RS422	TTL/ –

3.3. Кодові датчики переміщень

Кодові датчики переміщень (абсолютні шифратори переміщень) належать до другої групи перетворювачів, в яких кожен квантований рівень кодується незалежно від інших певною цифровою послідовністю. Це досягається однозначним фізичним поданням кожного квантованого рівня у вигляді певної кодової комбінації.

Кодування кожного квантованого рівня безперервно змінюваного параметра – переміщення цілком певної кодової послідовності дозволяє здійснювати її відтворення незалежно від попереднього результату. Це дає можливість знати значення квантованого рівня у будь-який момент відтворення і уникнути накопичення помилок.

Реалізувати кодування квантових рівнів можна за допомогою спеціальних кодових шкал відповідно до схеми, показаної на рис. 3.9. Виготовляють кодові шкали зазвичай із скла, а темні ділянки наносять методом фотолітографії.

При побудові двійкової кодової шкали всі її поля розбивають залежно від того, перетвориться лінійне або кутове механічне переміщення відповідно на доріжки лінійні або концентричні і на колонки або сектори. Приклад двійкової кодової шкали для вимірювання кутового переміщення зображено на рис. 3.10, а.

Кодова шкала дозволяє кожному квантованому рівню поставити у відповідність цілком певну кодову послідовність, тобто набір символів, складених за певним законом. При двійковому кодуванні кожен квантований рівень подається у вигляді двійкового числа X_n, X_{n-1}, \dots, X_0 . При побудові двійкової кодової шкали диск розділяється на концентричні доріжки і сектори. Приклад п'ятирозрядної кодової шкали для перетворення кутових переміщень показано на рис. 3.9. Коду нуля відповідають темні ділянки, коду одиниці – світлі. Зчитувальні елементи розташовані по радіусу диска. При переміщенні шкали зчитувальні елементи фіксують те, що з'являється під ними, і коди нулів і одиниць передають на вихід. Таким чином, кожному положенню кодової шкали на виході відповідає цілком певний код (двійкове число $D_0 - D_4$, див. рис. 3.9).

Недоліком перетворювачів з двійковою кодовою шкалою є жорсткі вимоги до точності виготовлення шкали. Неточність виготовлення шкали цих датчиків призводить до того, що при переході з одного сектора на інший (від одного двійкового числа до сусіднього) зчитувальні елементи різних розрядів можуть зафіксувати цей перехід не одночасно. У результаті з'являються помилки на межах зчитування, для усунення яких застосовують різні методи.

Метод обмеження зон відтворення полягає у введенні такого обмеження, при якому не допускається відтворення кодів на межах переходів з одного квантованого рівня на інший. Шкалу, що реалізує цей метод введенням додаткової доріжки з зонами, що визначають межі відтворення (світлі ділянки крайньої доріжки), зображено на рис. 3.10, б.

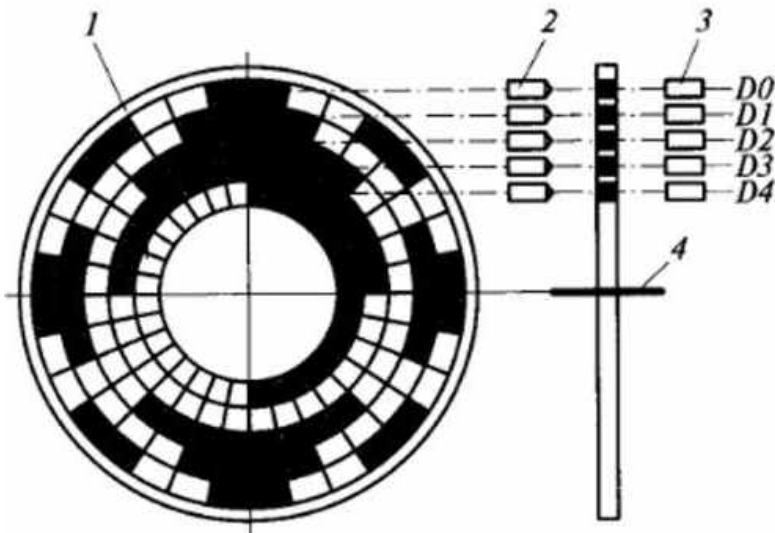
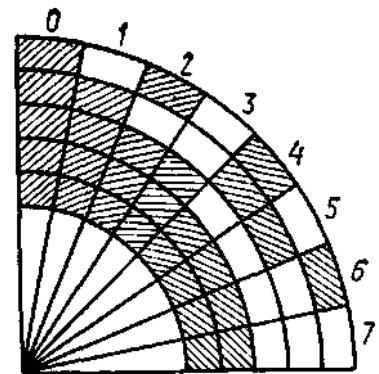
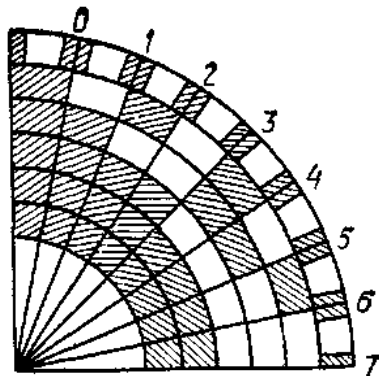


Рис. 3.9. Принцип роботи кодового датчика переміщень (абсолютний шифратор переміщень): 1 – кодувальний диск; 2 – джерела світла; 3 – фотоприймачі; 4 – вісь обертання



а



б

Рис. 3.10. Варіанти кодових шкал: а – двійкова кодова шкала, 0–7 – кодові доріжки; б – шкала з обмежувальними зонами, 0–7 – зони обмеження

Інший метод, що усуває великі помилки двійкових кодових шкал, обумовлені невизначеністю зчитування на межах квантування, полягає у використанні циклічних кодів, в яких перехід від однієї двійкової послідовності до іншої супроводжується зміненням коду тільки в одному розряді. При кодуванні доріжок зазвичай використовують код Грея, в якому дві сусідні кодові комбінації відрізняються тільки одним бітом. Це дозволяє позбутися великих помилок, спричинених неоднозначністю зчитування коду на межі секторів. Вихідні дані шифратора при цьому можна подати у вигляді коду Грея, звичайного двійкового коду або двійково-десятькового

VCD-коду. Для перетворення коду Грея на потрібний вихідний код схема абсолютного шифратора може містити відповідний перетворювач коду.

Код Грея є різновидом двійкового коду і будується за таким алгоритмом: якщо у старшому розряді бінарного коду стоїть нуль, то наступний розряд бінарного коду стає розрядом коду Грея, якщо одиниця, то розряд двійкового коду в комбінації коду Грея змінює свій стан на протилежний. Наприклад, кодова комбінація бінарного (двійкового) коду 0101 в коді Грея має вигляд 0111.

Для подання інформації у вигляді коду Грея кодувальний диск (маска) розділяють на концентричні кола, кількість яких дорівнює розрядності коду, що наноситься. Всю поверхню диска поділяють на сектори за кількістю можливих повідомлень $N = 2n$, де n – кількість розрядів. Нанесення кодових комбінацій на диск здійснюється таким чином: там, де в кодовій комбінації має бути одиниця, сегмент диска залишається прозорим, де нуль – непрозорим. Зазвичай зовнішнє коло надається старшому розряду кодової комбінації, внутрішнє коло – молодшому розряду (див. рис. 3.9).

Загальна кількість комбінацій на кодувальному диску вибирається такою, що дорівнює степеню числа 2. При п'яти доріжках, показаних на рис. 3.9, кількість кодових комбінацій становить $2^5 = 32$. У сучасних однооборотних шифраторах зазвичай 13 доріжок, що забезпечує $2^{13} = 8\,192$ відліки на один оберт диска.

Для підвищення точності вимірювання шифратори виготовляються багатооборотними, мають можливість підрахунку кількості обертів за допомогою редуктора. Прикладом такого датчика є кодовий перетворювач переміщень ППК-15, який випускався в СРСР. Пристрій і принцип дії цього датчика пояснюються функціональною схемою, показаною на рис. 3.11.

Датчик має вузли точного і грубого відліків (відповідно ТВ і ГВ). Механічні вузли пов'язані через редуктор 6 з передавальним відношенням 16:1, електричні – схемою 14 синхронізації відліків. ТВ кодує кутові положення вхідного вала в межах одного оберту, ГВ – цілу кількість обертів вхідного вала в межах 1–16. Оскільки принцип дії обох відліків однаковий, розглянемо роботу вузла ТВ.

Випромінювання від точкового освітлювача 5 проходить кодувальний пристрій (діафрагма 4 – кодовий диск 3) і потрапляє на фотоприймач (ФП) 2. Як ФП використовуються 11 відкритих фотодіодів, виготовлених на одному кристалі кремнію. Кодовий диск і діафрагма однакові в обох відліках і мають по 11 розрядів. Кодовий рисунок дисків виконаний у вигляді коду Грея. В ТВ використовуються 11 розрядів, в ГВ – тільки 5 старших. З ФП ТВ знімають 11-розрядний код Грея, який після проходження блока компараторів 16 перетвориться у перетворювачі коду 15 на 11-розрядний нормальний двійковий код. З ФП 11 знімається 5-розрядний код Грея, що

перетворюється після проходження блока компараторів 12 в перетворювачі коду 13 на 5-розрядний нормальний двійковий код. Далі сигнали цього коду подаються на схему 14 синхронізації відліків. Сюди надходить сигнал з 11-го розряду ТВ. З виходів схеми синхронізації знімається 4-розрядний код ГВ, синхронізований з 11-розрядним кодом ТВ.

У схемі синхронізації усувається вплив неточності механічної синхронізації відліків через редуктор, а також люфтів редуктора на правильність формування 15-розрядного вихідного коду. Схема синхронізації виконана на 4-розрядному суматорі. Вихідний буфер 17 забезпечує функціонування ланцюга «Опитування» і підсилює потужність вихідних сигналів.

У сучасних датчиках вбудований редуктор дозволяє фіксувати до 4 096 обертів. Тому повна розрядність багатооборотного абсолютного шифратора вже досягає 25 бітів, загальна кількість кодових комбінацій при цьому становить $2^{25} = 3\,355\,432$, точність вимірювання кута – 0,04 с.

Дані з виходу абсолютного шифратора можуть бути зчитані в будь-який момент часу. При вимиканні і наступному вмиканні датчика інформація не втрачається. Стандартні послідовні інтерфейси входять до складу сучасних абсолютних шифраторів для з'єднання з іншими елементами систем автоматики, які забезпечують гальванічну розв'язку і швидкість передачі даних до 12 Мбіт/с.

Виробництвом абсолютних шифраторів займаються фірми Omron Electronics, Peperl + Fuchs, Balluff та ін. У табл. 3.7 наведено параметри низки абсолютних шифраторів фірми Peperl + Fuchs.

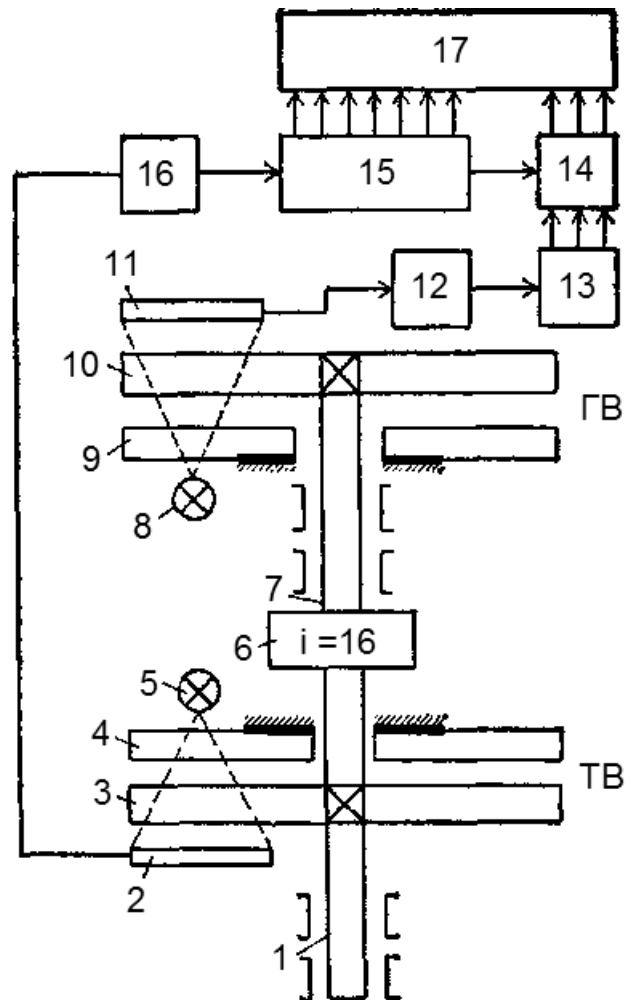


Рис. 3.11. Функціональна схема кодового датчика ППК-15: ГВ, ТВ – вузли грубого і точного відліків; 1 – вхідний вал; 2, 11 – фотоприймачі (ФП); 3, 10 – кодові диски; 4, 9 – діафрагми; 5, 8 – освітлювачі; 6 – редуктор; 7 – вал редуктора; 12, 15 – блоки компараторів; 13, 16 – перетворювачі коду; 14 – схема синхронізації відліків

Таблиця 3.7

Характеристики абсолютних шифраторів фірми Peperl + Fuchs

Параметр	Модель			
	AVE10	AVM10	SCS10	PVM10
Розрядність	12	24	13	25
Кількість обертів	1	4 096	1	4 096
Вихідний код	Двійковий, код Грея	Двійковий, код Грея	Двійковий, BCD-код, код Грея	Двійковий
Інтерфейс	RS422, SSI	RS422, SSI	Паралельний	RS485

3.4. Рекомендації щодо вибору датчиків положення і переміщення

При виборі типу датчика переміщення для роботи у складі розроблюваної системи керування необхідно:

1. Визначити основні пріоритети серед вимог, що ставляться до параметрів датчика (табл. 3.8), виділити серед них головні (у порядку забезпечення максимальної ефективності роботи проекрованої системи керування) і в цьому ж порядку у вигляді відповідей на запитання заповнити перший стовпчик табл. 3.9.

2. Відповідно до розставлених пріоритетів заповнити другий стовпчик табл. 3.9, відповідаючи на запитання з першого стовпчика.

3. Заповнити стовпчики третій, четвертий і п'ятий табл. 3.9 на підставі аналізу технічних характеристик трьох типів датчиків переміщень, що випускаються різними виробниками. Найбільш оптимальним за своїми характеристиками датчиком для певної системи керування є той, у якого за основними вибраними критеріями значення параметрів не гірше значень у другому стовпчику табл. 3.9.

Ретельний попередній аналіз при заповненні табл. 3.9 допомагає не допустити небажаних помилок і отримати оптимальні результати при проектуванні системи керування технологічним об'єктом.

Таблиця 3.8

Основні параметри датчиків переміщення

Характеристика датчика	Одиниця виміру
Тип вимірюваних переміщень (лінійне/кутове)	м, рад
Вид вимірюваних переміщень (відносне/абсолютне)	м, рад
Величина вимірюваного переміщення (min, max, діапазон)	м
Роздільна здатність і точність	м
Нелінійність характеристики	%

Характеристика датчика	Одиниця виміру
Швидкість вимірюваного процесу	м/с
Умови експлуатації (вологість, температура, джерела перешкод, вібрація і т. д.)	град, Гц і т. д.
Клас захисту	Визначається за ГОСТом
Надійність (ресурс)	год
Споживана потужність	Вт
Габаритні розміри	м х м х м
Маса	кг
Вартість	грн

Таблиця 3.9

Необхідні характеристики датчика переміщення

Запитання для визначення основних параметрів датчиків	Значення параметра			
	Необхідне для роботи СК	Забезпечується датчиком		
		Тип 1	Тип 2	Тип 3
Яка величина вимірюваного переміщення (min, max, діапазон)?				
Який вид вимірюваних переміщень?				
Який тип вимірюваних переміщень?				
Якими мають бути роздільна здатність і точність?				
В яких умовах навколишнього середовища має працювати датчик?				
Якою має бути споживана потужність датчика?				
Який термін служби датчика?				
Який розмір простору відведено для монтажу датчика?				
З чого виготовлений об'єкт, переміщення якого необхідно виміряти (з металу, пластмаси або інших матеріалів)?				
Якою має бути вартість датчика?				
Яким має бути клас захисту?				
Яка допустима нелінійність?				
Яка швидкість руху?				

4. ДАТЧИКИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ

4.1. Загальні відомості

Під тиском у загальному випадку розуміють границю відношення нормальної складової зусилля до площі, на яку діє зусилля. Цей параметр стану робочого середовища дуже часто визначає хід багатьох технологічних процесів. Звідси виникає необхідність застосування великої кількості засобів вимірювання тиску і різниці тисків, різних за принципом їх дії, устаткуванням для їх реалізації, призначенням і точністю.

Розрізняють *абсолютний, атмосферний, надмірний і вакуумметричний тиск*.

Абсолютний тиск P_a – це тиск, виміряний відносно абсолютного нуля, що відповідає абсолютному (100 %) вакууму. При вимірюванні P_a за початок відліку беруть нульовий тиск, який можна уявити як тиск всередині посудини після повного відкачування повітря. Природно, досягти нульового абсолютного тиску ($P_a = 0$) неможливо.

Атмосферний тиск $P_{атм}$ – це тиск стовпа повітря, що зменшується в міру збільшення висоти над поверхнею Землі. Величина атмосферного тиску $P_{атм}$ на висоті h визначається барометричною формулою

$$P_{атм} = P_0 \exp(-h/H),$$

де P_0 – тиск біля поверхні Землі на рівні моря; $H = KT / (\mu m_1 g)$ – шкала висот, що визначається температурою T і середньою молекулярною вагою μ повітря; m_1 – маса атома водню; g – прискорення сили тяжіння; k – стала Больцмана.

Надлишковий тиск $P_{над}$ дорівнює різниці між абсолютним тиском, більшим атмосферного, і атмосферним тиском:

$$P_{над} = P_a - P_{атм}.$$

Вакуумметричний тиск P_v (розрідження або вакуум) – це різниця між атмосферним і абсолютним (меншим атмосферного) тисками:

$$P_v = P_{атм} - P_a.$$

При контролі технологічних процесів і проведенні наукових досліджень у більшості випадків доводиться мати справу з вимірюванням надлишкового та вакуумметричного тиску, а також з вимірюванням різниці тисків

$$\Delta P = P_2 - P_1.$$

Залежно від виду вимірюваного тиску розрізняють такі прилади (датчики):

- барометри, що вимірюють атмосферний тиск; тому атмосферний тиск часто називають барометричним;

- манометри абсолютного тиску, призначені для вимірювання абсолютного тиску;

- манометри надлишкового тиску і вакуумметри, що вимірюють надлишковий або вакуумметричний тиск;

- напороміри і тягоміри, що вимірюють малий надлишковий тиск (наприклад, тиск повітря, що подається в топку котла) і розрідження газу (наприклад, в газопроводі котла);

- мановакуумметри, призначені для вимірювання вакуумметричного й надлишкового тисків, а для вимірювання дуже малих тисків (розрідження) газу (наприклад, в топці котла) – тягонапороміри;

- мікроманометри, що вимірюють дуже малі тиски (нижче і вище барометричного) і незначні різниці тисків;

- диференціальні манометри (дифманометри), призначені для вимірювання різниці тисків.

Класифікація приладів для вимірювання тиску за принципом дії:

- рідинні (вимірюваний тиск зрівноважується стовпом рідини);

- поршневі (тиск зрівноважується зовнішньою силою, що діє на поршень);

- пружинні (тиск вимірюється за величиною деформації пружного елемента);

- електричні (тиск перетворюється на яку-небудь електричну величину).

Одиниці тиску. З числа тих, що допускаються до застосування в Україні одиниць тиску, кращою є паскаль (Па) – одиниця СІ (Міжнародної системи одиниць). Паскаль – це тиск силою 1 Н на поверхню площею 1 м² (1 Па = 1 Н/м²).

Для застосування допускаються також позасистемні одиниці тиску: технічна атмосфера (скорочена назва – ат або кгс/см²), бар (бар), міліметр водяного стовпа (мм вод. ст.) і міліметр ртутного стовпа (мм рт. ст. – торр). Співвідношення між одиницями тиску наведено в табл. 4.1.

Крім зазначених вище одиниць тиску застосовують фізичну атмосферу (атм), що дорівнює тиску стовпа ртуті висотою 760 мм при $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ і нормальному прискоренні вільного падіння: $g = 9,80665\text{ м/с}^2$.

4.2. Перетворювачі тиску типу «Сапфір»

Датчики тиску такого типу забезпечують безперервне перетворення значень вимірюваного параметра (тиску надлишкового, абсолютного, розрідження, різниці тисків нейтральних і агресивних середовищ) на уніфіко-

ваний струмовий сигнал (див. підрозд. 2.1) для дистанційної передачі по лінії зв'язку. Датчики «Сапфір» застосовуються для контролю за тиском в атомній, хімічній, газотранспортній та інших галузях промисловості.

Таблиця 4.1

Співвідношення між одиницями тиску

Одиниця тиску	Па	ат (кгс · см ²)	Бар	мм вод. ст.	мм рт. ст.
Паскаль (Н/м ²)	1	$1,0197 \cdot 10^{-5}$	10^{-5}	0,1	$7,50 \cdot 10^{-3}$
Технічна атмосфера	$9,8066 \cdot 10^4$	1	0,98066	10^4	$7,36 \cdot 10^2$
Бар	10^{-5}	1,0197	1	$1,0197 \cdot 10^4$	$7,50 \cdot 10^2$
Міліметр водяного стовпа	10	$1,02 \cdot 10^{-4}$	$0,97 \cdot 10^{-4}$	1	$7,50 \cdot 10^{-2}$
Міліметр ртутного стовпа (торр)	$1,33 \cdot 10^2$	$1,359 \cdot 10^{-3}$	$1,33 \cdot 10^{-2}$	13,3	1

Конструктивні схеми деяких різновидів датчиків «Сапфір» зображено на рис. 4.1.

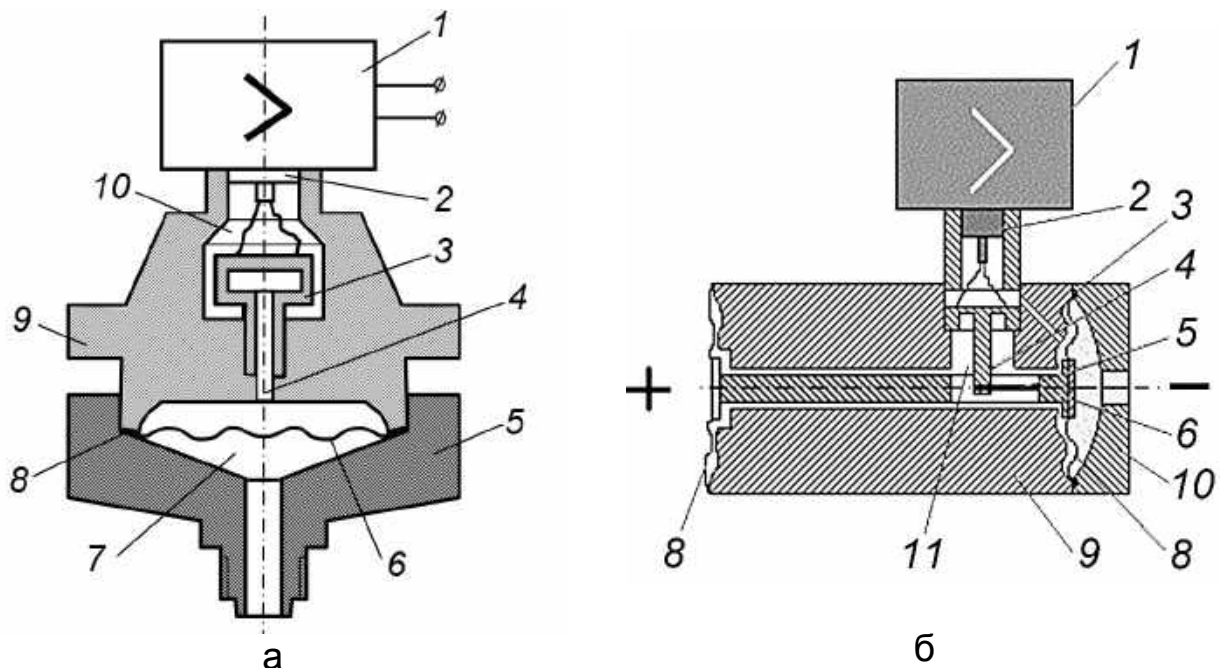


Рис. 4.1. Конструктивні схеми датчиків «Сапфір»:
 а – конструкція для вимірювання надлишкового та абсолютного тисків;
 б – конструкція для вимірювання диференціального тиску

На рис. 4.1, а показано конструкцію для вимірювання надлишкового та абсолютного тисків. У ній мембранний тензоперетворювач 3 розміщений всередині основи 9. Внутрішня порожнина 4 тензоперетворювача заповнена кремнійорганічною рідиною і відділена від вимірюваного середовища металевою гофрованою мембраною 6, привареною по зовнішньому контуру до основи 9. У конструкції для вимірювання надлишкового тиску порожнина 10 сполучається з навколишньою атмосферою, а в конструкції для вимірювання абсолютного тиску – вона вакуумована.

Тиск, що вимірюється, подається в камеру 7 фланця 5, який ущільнено прокладкою 8. Це тиск впливає на мембрану 6 і через рідину – на мембрану тензоперетворювача, спричиняючи її прогин і змінення опору тензорезисторів. Електричний сигнал від тензоперетворювача передається з вимірювального блока 1 по проводах через гермовивід 2.

Перетворювачі «Сапфір-22ДА» моделей 2050 і 2060, призначені для вимірювання абсолютного тиску, відрізняються тим, що порожнина 10 вакуумована і герметизована.

Перетворювачі «Сапфір-22ДД» моделей 2410, 2420, 2430, 2434, 2440 і 2444 (рис. 4.1, б), призначені для вимірювання різниці тисків, відрізняються тим, що в них використовується тензоперетворювач мембранно-важільного типу, який розміщений всередині основи в замкнутій порожнині, заповненій кремнійорганічною рідиною, і відділений від вимірюваного середовища двома металевими гофрованими мембранами 8. Мембрани з'єднані між собою центральним штоком 6, переміщення якого передається важелю тензоперетворювача 4, що спричиняє деформацію тензоперетворювача. Чутливим елементом тензоперетворювача є пластина з монокристалічного сапфіру (різновид корунду – Al_2O_3) з кремнієвими плівковими тензорезисторами (структура КНС – кремній на сапфірі).

Електричний сигнал від тензоперетворювача передається з вимірювального блока в електронний пристрій 1 по проводах через гермоввід 2. Вимірювальний блок витримує без руйнування вплив одностороннього перевантаження робочим надлишковим тиском. За такої конструкції при перевантаженні одна з мембран 8 лягає на профільовану поверхню основи 9.

Блок-схему електронного пристрою 1, що виконує функції нормувального перетворювача, показано на рис. 4.2.

При вмиканні живлення датчика джерело струму живлення тензоперетворювача (ДСТП) живить струмом тензоперетворювач (ТензоП), розміщений у вимірювальному блоці (ВБ). Вихідна напруга з ТензоП надходить на вхід вимірювального підсилювача (ВП), а температурний сигнал з

ТензоП – на вхід вимірювального підсилювача температурного сигналу (ВПТС), з виходу якого через інвертор температурного сигналу (ІТС) надходить на входи температурного коректора «нуля» (ТКН), температурного коректора «діапазону» (ТКД) і компаратора (КОМП). Після порівняння з сигналом КОМП коригувальні напруги з виходів ТКН і ТКД надходять у ВП і перший вхід ДСТП відповідно.

З виходу ВП вимірювальний сигнал через нормувальний підсилювач (НП) надходить на входи масштабного підсилювача (МП) і коректора нелінійності (КН). З виходу КН сигнал надходить на другий вхід ДСТП, з виходу якого надходить в ТензоП.

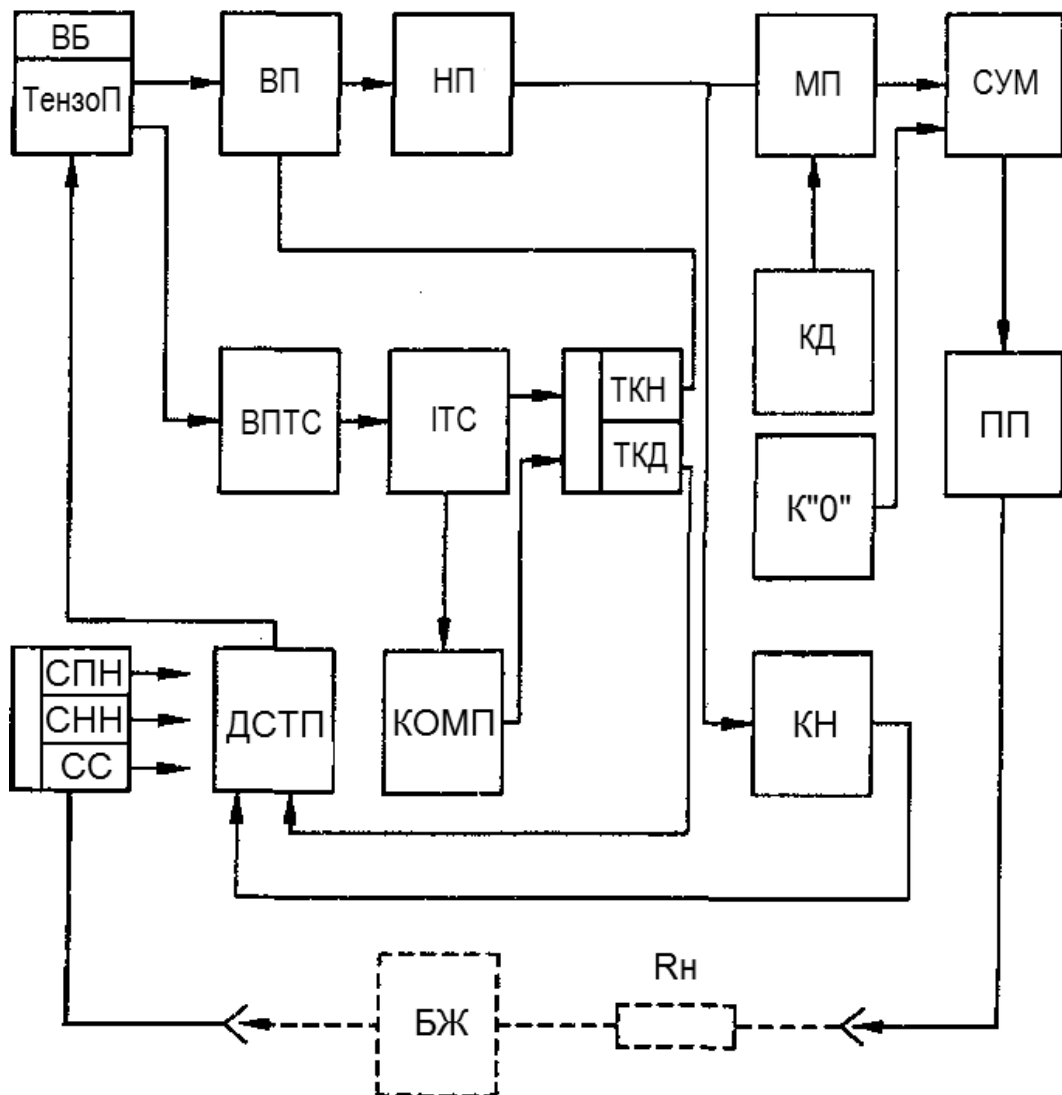


Рис. 4.2. Блок-схема електронного пристрою датчика тиску «Сапфір»

Коректор діапазону (КД) задає коефіцієнт перетворення МП, а коректор «нуля» (К''0'') – зміщення нуля на виході датчика.

Сигнал з виходу МП надходить в акумулятор (СУМ) і далі в підсилувач потужності (ПП), який перетворює напругу на вихідний струм.

Стабілізацію напруги живлення виконують стабілізатори позитивного (СПН) і негативного (СНН) напружень, а стабілізацію струму живлення – стабілізатор струму живлення (СС).

З іншими конструкціями датчиків тиску «Сапфір» українського виробництва, схемами їх підключення до блоків живлення та іншими технічними характеристиками можна ознайомитися в керівництві з експлуатації цих датчиків [10].

4.3. Сучасні датчики для вимірювання тиску

4.3.1. Застосування технологій MEMS

На сьогодні однією з передових технологій є технологія мікроелектромеханічних систем – MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems). Під технологією MEMS розуміють технологію мікрообробки, що дозволяє виготовляти кремнієві мікросхеми з крихтливими механічними елементами – інтелектуальними машинами з самими різними функціями. Отже, MEMS – це об'єднання механічних елементів, датчиків, приводів і електроніки на одній кремнієвій основі (підкладці).

Світовий ринок MEMS є дуже динамічним і постійно зростає (за оцінками на 13...15 % щороку). Цю галузь індустрії в Японії називають мікромашинами (Micromachines), а в Європі – мікросистемні технології (Micro System Technology).

Усі елементи мікроелектромеханічних систем можуть бути реалізовані у вигляді єдиного виробу, причому відразу десятками або сотнями як мікросхеми на кремнієвій пластині. В основі цього виробництва лежить апробована традиційна технологія створення напівпровідникових інтегральних мікросхем. При розробленні й виробництві виробів MEMS одночасно вирішуються питання їх уніфікації та стандартизації для ефективного використання в апаратурі нового покоління.

Багато експертів, включаючи фахівців Integrated Sensing Systems (www.mems-issys.com) – однієї з провідних фірм в цій галузі, вважають, що MEMS-технологія вносить буквально революційні змінення у кожен область застосування шляхом поєднання мікроелектроніки на основі кремнію з мікромеханічною технологією, що дозволяє реалізувати систему на одному кристалі SoC (Systems-on-a-Chip). Так, технологія MEMS дала новий імпульс для розвитку систем інерціальної навігації та інтегрованих систем, відкривши шлях до розроблення «розумних» виробів, збільшивши обчислювальні здатності мікродатчиків і розширивши можливості дизайну таких систем.

Сьогодні MEMS-пристрої застосовуються практично всюди. Це можуть бути мініатюрні деталі (гідравлічні і пневматичні клапани, струминні

сопла принтерів, пружини для підвіски головки вінчестера), мікроінструменти (скальпелі і пінцети для роботи з об'єктами мікронних розмірів), мікромашини (мотори, насоси, турбіни завбільшки з горошину), мікророботи, мікродатчики і виконавчі пристрої, аналітичні мікролабораторії (на одному кристалі) і т. д.

Найважливіша складова частини більшості MEMS – мікроактюатор. Зазвичай цей пристрій перетворює енергію на керований рух. Розміри мікроактюаторів можуть досить сильно варіюватися. Діапазон застосування цих пристроїв надзвичайно широкий і при цьому все більше розширюється. Всі методи активації (рух, деформація, приведення в дію) в таких пристроях стисло можна звести до таких: електростатичний, магнітний, п'єзоелектричний, гідравлічний і тепловий. Для оцінювання мікроактюаторів використовують такі критерії якості, як лінійність, точність, похибка, повторюваність, розділення, гістерезис, порогове значення, люфт, шум, зміщення, несуча здатність, амплітуда, чутливість, швидкість, перехідна характеристика, масштабованість, вихід за енергією.

Важливою перевагою кремнієвих сенсорів є більш висока чутливість. Цей параметр майже у сто разів вище, ніж у класичних тензоперетворювачах з металевою діафрагмою, на яку напілюється тензорезистивний шар. Інші переваги цих сенсорів – більш висока точність і лінійність характеристики перетворення «тиск-напруга». Зчеплення п'єзорезисторів вимірювального моста з кремнієвою діафрагмою на молекулярному рівні дозволяє виключити похибки, пов'язані з передачею деформації. Перевагами таких напівпровідникових датчиків є компактність, невисока вартість (при серійному виробництві), висока надійність і простота експлуатації.

4.3.2. Датчики тиску MPX фірми Motorola

Датчики реалізовано з використанням технології MEMS, що дозволило отримати точний, якісний аналоговий вихідний сигнал, пропорційний прикладеному тиску. Датчики, призначені для вимірювання абсолютного, надлишкового, диференціального тисків в діапазоні від 0 до 1000 кПа, виробляються в різному конструктивному виконанні (рис. 4.3).

Область застосування датчиків – індикатори рівня, індикатори витoku (зменшення тиску), медичне обладнання, барометри, альтиметр і т. д.

Основним елементом датчика тиску є кристал з кремнію (рис. 4.4, а), в якому сформована діафрагма з поверхневим чутливим елементом – імплантованим тензорезистивним ланцюжком *X-ducer* (рис. 4.4, б).

На відміну від напівпровідникових датчиків з мостом з чотирьох резисторів (застосовуваних в чутливих елементах датчиків «Сапфір») використання одного запатентованого чутливого елемента *X-duser* виключає необхідність точного узгодження чотирьох чутливих до тиску і температури

резисторів, що складають міст Уінстона. Крім того, істотно спрощуються додаткові схеми, необхідні для калібрування і температурної компенсації.

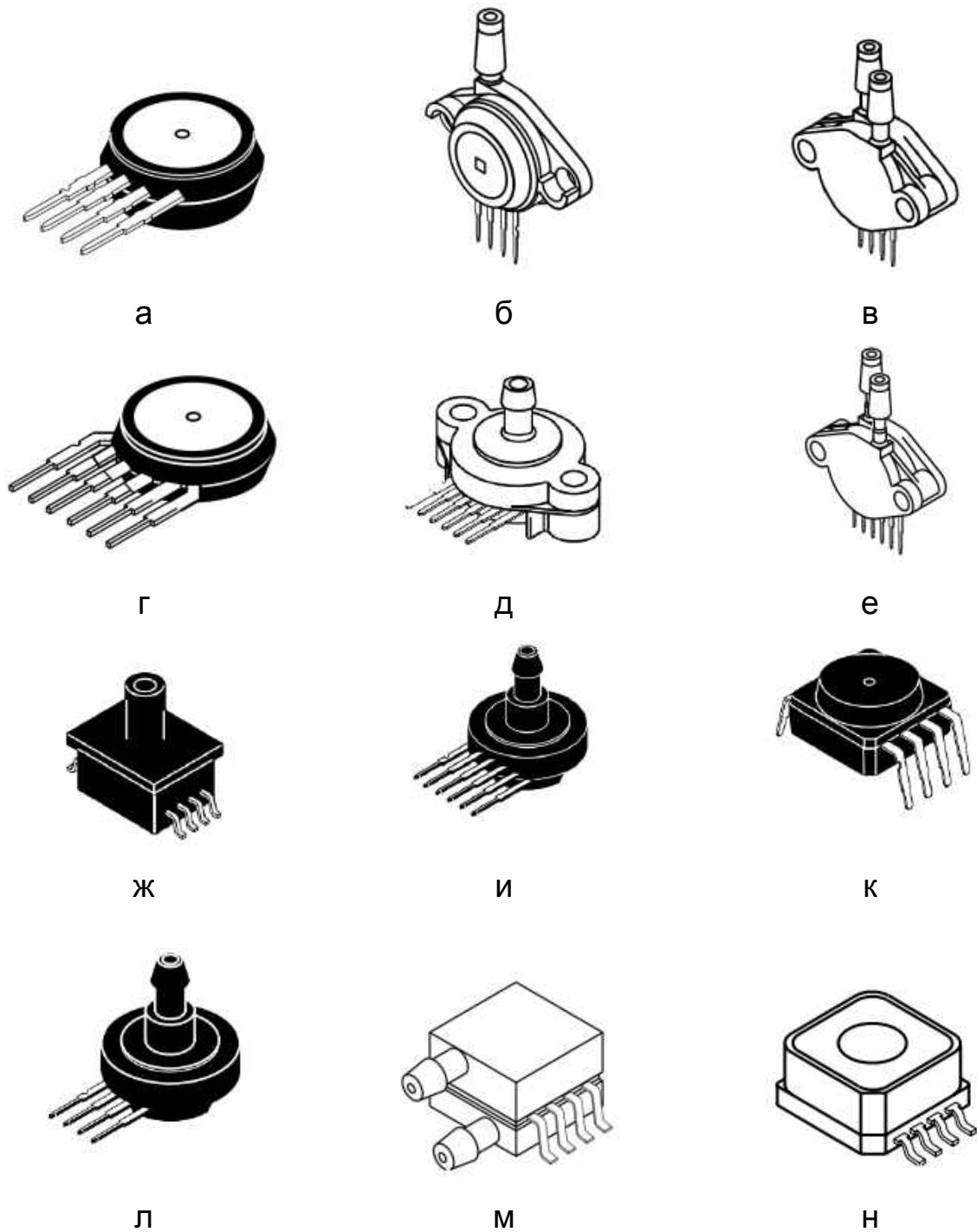
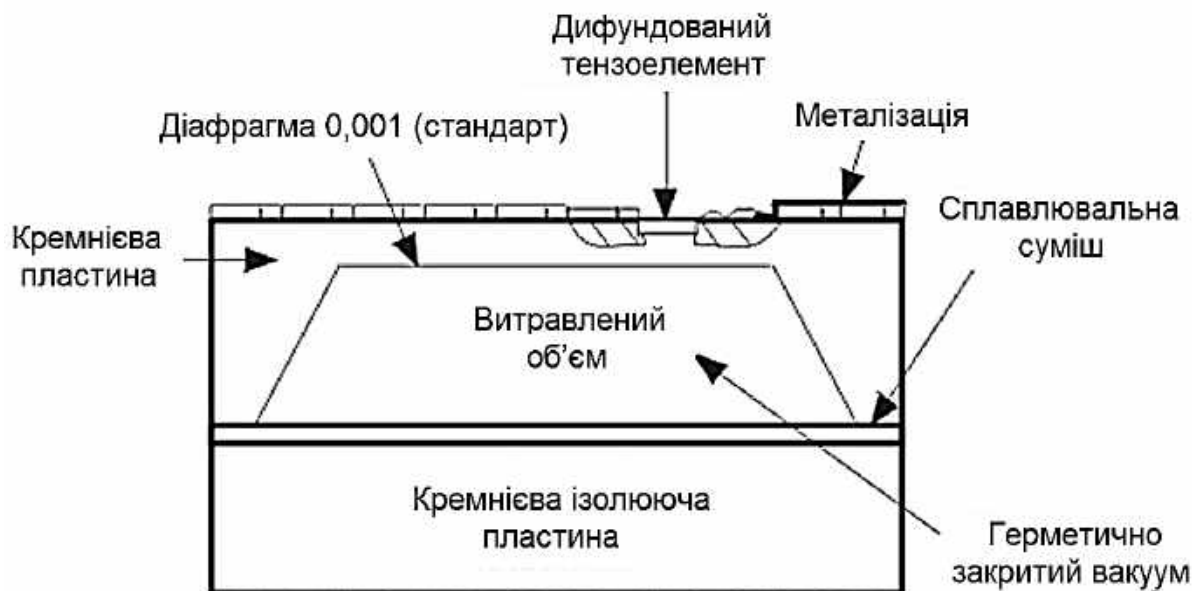
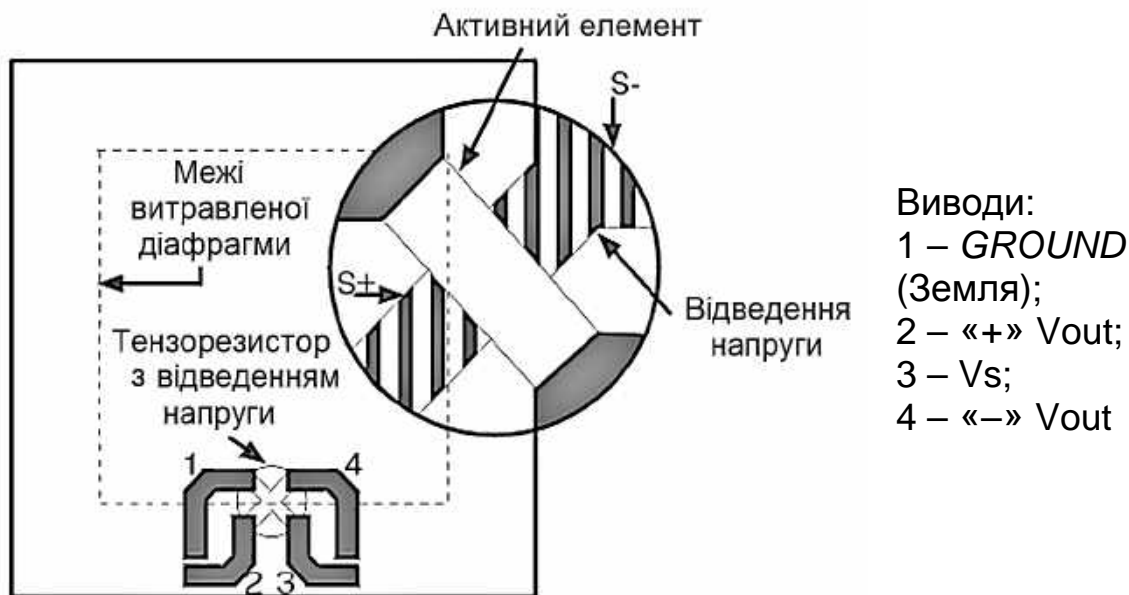


Рис. 4.3. Варіанти конструктивного виконання датчиків тиску серії MPX фірми Motorola: а – корпус 344; б – корпус 344В; в – корпус 344С; г – корпус 867; д – корпус 867F; е – корпус 867С; ж – корпус 1320А; и – корпус 867Е; к – корпус 482В; л – корпус 344Е; м – корпус 1351; н – корпус 1352



а



б

Рис. 4.4. Кристал датчика абсолютного тиску MPX (а)
і чутливий елемент X-ducer (б)

Різниця між кристалами датчиків диференціального і абсолютного тисків полягає в тому, що в останньому немає отвору в нижній (герметизувальній) кремнієвій пластині, і порожнина, яка сформована поглибленням, витравленим у верхній пластині, і нижньою пластинкою, знаходиться під розрідженим повітрям (вакуумом), що створює опорний тиск (див. рис. 4.4, а). Кремнієвий гель ізолює поверхню кристала і сполучні провідники від пошкодження твердими частинками, які можуть виявитися в середовищі, що передає тиск на діафрагму.

Принцип роботи датчика: струм збудження проходить по резистору (відводи 1 і 3), а тиск, що подається до діафрагми, впливаючи на неї, згинає резистор. Вигин призводить до виникнення в резисторі поперечного електричного поля, яке виявляється як напруга на відводах 2 і 4, з'єднаних з середньою точкою резистора (див. рис. 4.4, б). Вихідний сигнал змінюється пропорційно прикладеному тиску.

Тензодатчик є інтегральною частиною діафрагми, отже, його температурний коефіцієнт не відрізняється від температурного коефіцієнта діафрагми. Вихідні параметри самого тензодатчика все ж залежать від температури, і для забезпечення розширеного діапазону робочих температур необхідною є температурна компенсація. При температурі від 0 до 85 °С досить простого резистивного ланцюжка, реалізованого на тому ж кристалі, але при більш широкому діапазоні температур, наприклад від -40 до +125 °С, потрібна більш складна схема компенсації. Така додаткова компенсація реалізується зовнішніми схемами.

Кристал датчика тиску серії MPX розташовується на кремнієвому кристалотримачі, який приклеєний до корпусу датчика (рис. 4.5). Внутрішня порожнина заповнена кремнійорганічною рідиною – компаундом. Пластмасовий корпус закритий кришкою з нержавіючої сталі. У корпус впресовано зовнішні виводи, які за допомогою золотих дротів з'єднуються з рамкою виводів 1 – 4 кристала датчика тиску.



Рис. 4.5. Поперечний переріз базового корпусу датчика MPX диференціального тиску

Датчики тиску серії MPX поставляються у вигляді базових елементів без компенсації, базових елементів з температурною компенсацією і калібруванням і зі схемою повної нормалізації (інтегровані) вихідного сигналу (сімейство MPX 5000), розміщеною на цьому ж кристалі.

Некомпенсовані – найпростіший тип датчиків. Ці базові прилади розміщуються в корпусі чотирививідного чутливого елемента (рис. 4.6).

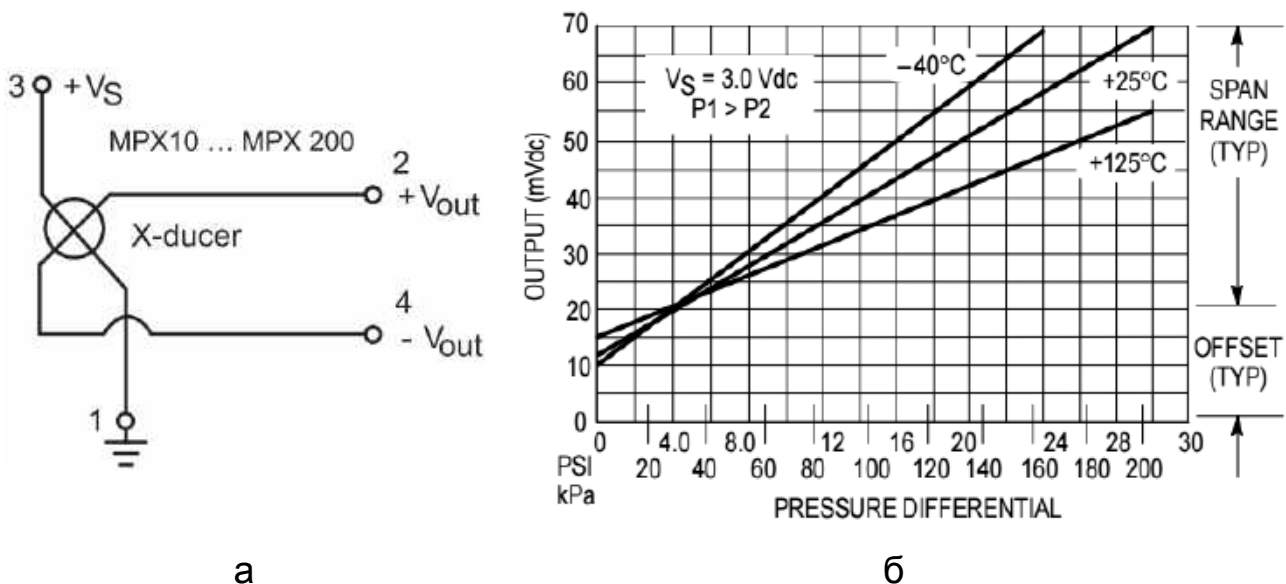


Рис. 4.6. Електрична схема (а) і вихідна характеристика (б) датчика без температурної компенсації

Чутливість, зміщення (вихідна напруга при нульовому тиску на діафрагму) і діапазон вихідних напруг такого датчика значною мірою залежать від температури. Крім того, ці параметри мають технологічний розкид між зразками.

Термокомпенсувальні і калібрувальні датчики істотно спрощують задачу розробнику (рис. 4.7).

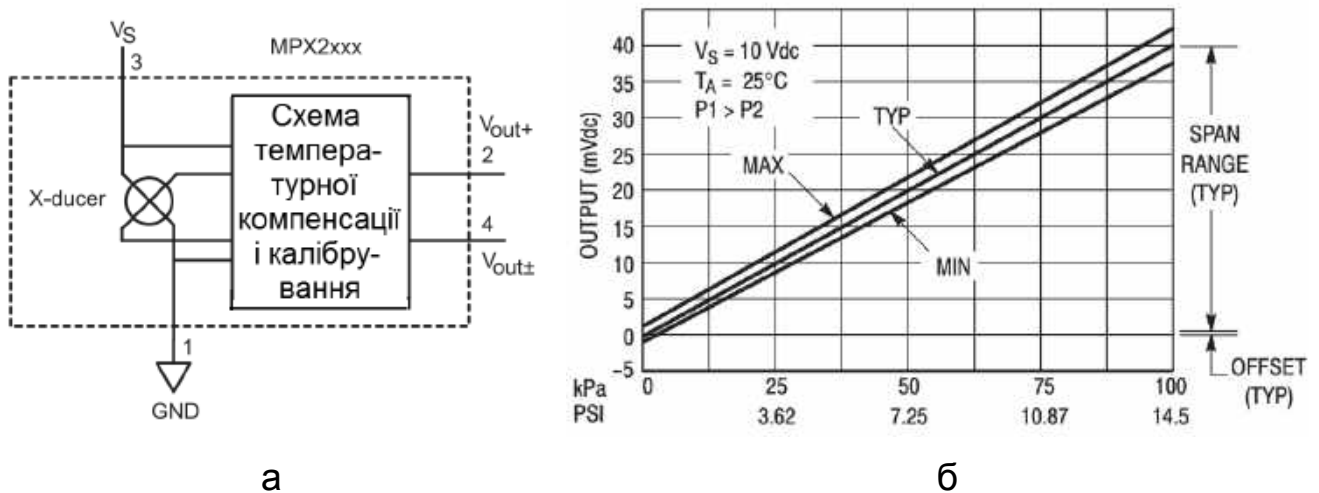
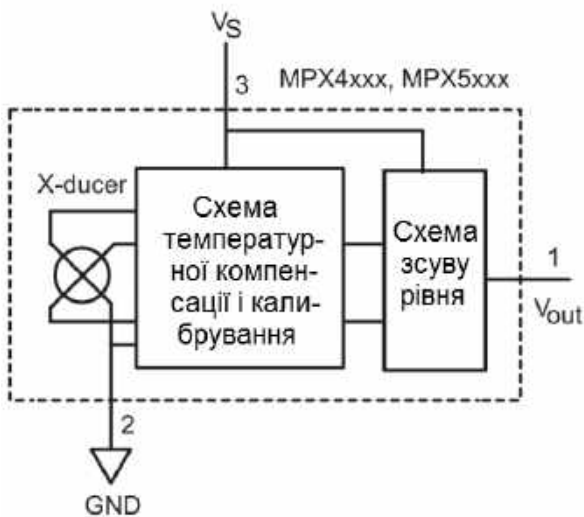


Рис. 4.7. Електрична схема (а) і вихідна характеристика (б) термокомпенсувального датчика

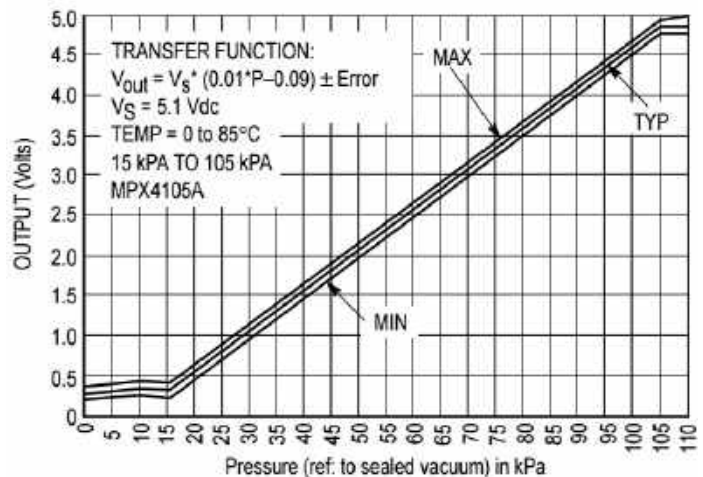
Ці прилади крім чутливих елементів містять також вбудовані в кристал тонкоплівкові резистори і термістори, калібровані за допомогою лазерної пригонки, щоб забезпечити відносно стабільний вихідний сигнал. Такі параметри, як зміщення і діапазон, калібрують при виготовленні датчика.

Калібрування вимірювальних приладів полягає у визначенні залежності між показаннями приладу і розміром вимірюваної (вхідної) величини. Під калібруванням часто розуміють процес підстроювання показань вихідної величини або індикації вимірювального інструменту до досягнення узгодження між еталонною величиною на вході і результатом на виході (з урахуванням зазначеної точності).

Для того щоб полегшити проектування систем, в яких використовуються датчики тиску, фірма Motorola збільшила рівень інтеграції датчиків. У цих датчиках (серії MPX 5000) крім вбудованих температурної компенсації і калібрування, реалізованих в датчиках попередньої серії (MPX 2000), на кристалі встановлено підсилювач нормалізації сигналу, який збільшує вихідний сигнал до стандартної величини 4,5 В. Таке рішення дозволяє використовувати прямий інтерфейс датчика з аналого-цифровим перетворювачем системи керування. Електричну схему і вихідну характеристику інтегрованого датчика зображено на рис. 4.8.



а



б

Рис. 4.8. Електрична схема (а) і вихідна характеристика (б) інтегрованого датчика

Випуском сучасних датчиків для вимірювання тиску, у тому числі з використанням технології *MEMS* і її різновидів *iMEMS*, займаються багато провідних світових виробників, такі як група компаній Endress + Hauser, Rosemount та ін., з продукцією яких можна ознайомитися в каталогах, які випускаються ними.

4.3.3. Підвищення точності вимірювання тиску

У деяких випадках, коли потрібно отримати в окремих обсягах рівні тиски, їх максимальну рівність можна забезпечити за допомогою багатока-

нальної компараторної системи корекції показань датчиків, наведеної в [13].

Похибка вимірювання тиску (сумарна похибка) датчиком визначається його конструкцією і складається з низки складових. Для датчиків серії MPX 5000 виробник гарантує, що максимальна сумарна похибка не буде перевищувати $\pm 2,5\%$ в інтервалі температур $0...85\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Істотно знизити похибку вимірювальної системи при створенні рівних тисків в різних ємностях можна за допомогою методу багатоканальної корекції показань датчиків. Принцип методу для трьох датчиків показано на рис. 4.9, конструктивну реалізацію методу – на рис. 4.10.

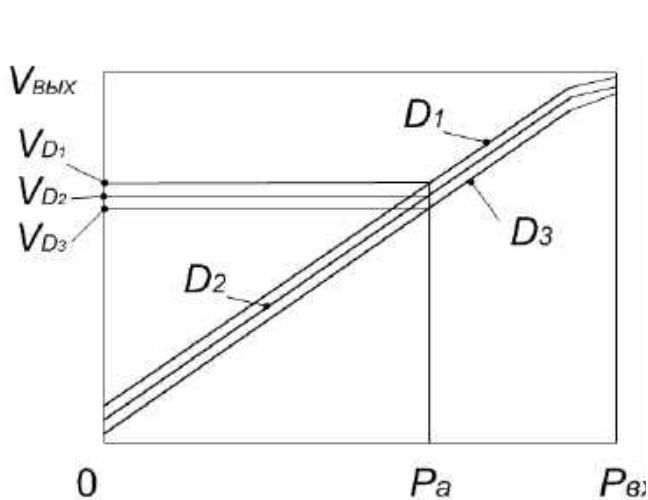


Рис. 4.9. Принцип багатоканального коригування датчиків:

- D_1 – характеристика датчика D_A ;
- D_2 – характеристика датчика D_B ;
- D_3 – характеристика датчика D_C ;
- V_{D1}, V_{D2}, V_{D3} – вихідні сигнали

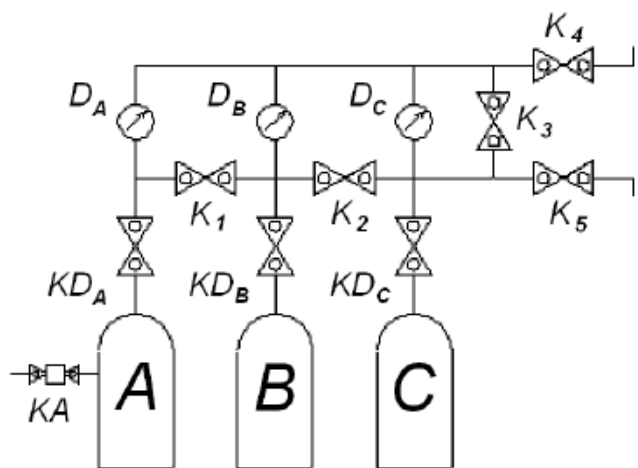


Рис. 4.10. Схема багатоканального коригування датчиків: D_A, D_B, D_C – датчики тиску за відповідним газовим каналом; KD_A, KD_B, KD_C – запірні клапани; KA – дозувальний клапан каналу A ; K_1, K_2, K_3 – клапани, що працюють у режимі калібрування; K_4 – клапан напуску повітря; K_5 – відкачувальний клапан

Відповідно до запропонованого методу спочатку всі три датчики вимірюють тиск в одній ємності, наприклад в ємності A . Для реалізації розробленого методу без втрати точності зовсім неважливо, яке абсолютне значення тиску береться за відлікове в цій ємності (наприклад, 6,0, 6,1, 5,9 атм або інше, близьке до них). Тому реально існуючий тиск в цій ємності і показання датчика тиску D_1 (D_A) можна брати за зразкові. Якщо зафіксувати в пам'яті системи керування показання всіх трьох датчиків при однаковому тиску P_a (V_{D1}, V_{D2}, V_{D3}), то потім при роботі кожного датчика на окрему ємність при видачі ними сигналів $V_{D1}, V_{D2}, i V_{D3}$ буде припинятися заповнення відповідної ємності, оскільки тиск в ній досягне рівня P_a .

Для калібрування датчиків (наприклад, заміна одного з датчиків або

періодичне калібрування для урахування ефекту «старіння») реалізується такий алгоритм дій.

1. У початковому стані всі клапани знеструмлені і знаходяться в закритому положенні, крім клапана K_4 , нормальне положення якого – відкрито.

2. За сигналом «Калібрування датчиків» відкриваються клапани K_{Da} , K_1 і K_2 . Одночасно дозувальний клапан K_{2a} починає роботу в імпульсному режимі, при кожному спрацьовуванні вкидаючи порцію газу A у вхідну ємність A . При цьому тиск в ємності починає підвищуватися.

3. Оскільки з відсічних клапанів відкритий тільки K_{Da} , при відкритих клапанах K_1 і K_2 усі три датчики одночасно вимірюють змінення тиску у вхідній ємності A . При цьому вихідні сигнали від датчиків надходять в систему керування.

4. При заданому рівні сигналу, наприклад від датчика D_A , в пам'яті системи керування відбувається фіксація рівнів сигналу від інших датчиків (D_B і D_C). Така фіксація дозволяє коригувати показання датчиків, що і здійснює система керування при подальшій роботі.

Таке калібрування проводиться при першому запуску пристрою, заміненні одного з датчиків або з якої-небудь іншої причини, а також періодично, наприклад один раз на квартал, для коригування змінення характеристик датчиків з часом.

4.4. Рекомендації щодо вибору датчиків тиску

При виборі датчика тиску для конкретного застосування у складі інформаційної системи проводять комплексний аналіз умов його роботи:

– визначають тип і діапазон вимірюваного тиску (абсолютний, надмірний або диференціальний; перепад робочого тиску; значення максимального та мінімального тисків; статичний або динамічний вплив);

– узгоджують метрологічні характеристики датчика з вимогами вимірювань (точність вимірювання тиску, температурний дрейф, динамічні характеристики і т. д.);

– враховують вплив навколишнього середовища (перепадів температури, вібрації, ударів, вологості, електромагнітних перешкод, перешкод в інформаційних ланцюгах і ланцюгах живлення);

– виконують аналіз вимог за погодженням з лінією зв'язку системи керування (аналоговий або цифровий вихідний сигнал, тип інтерфейсу);

– враховують вимоги до механічної установки (габаритні і настановні розміри);

– враховують економічні і логістичні вимоги (вартість; надійність постачальника);

– визначають ресурсні характеристики датчика і показники надійності (термін служби, ймовірність безвідмовної роботи);

– враховують показник ремонтпридатності.

5. ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

5.1. Методи вимірювання температури

Температура є одним з найважливіших параметрів як в наукових дослідженнях, так і в технологічних процесах багатьох галузей промисловості. За оцінками фахівців, технічні вимірювання температури становлять 40...50 % від загальної кількості всіх вимірювань. Наприклад, середня за величиною атомна станція має приблизно 1500 контрольних (вимірювальних) точок, а велике хімічне виробництво – вже близько 20 тисяч.

Поняття абсолютної температури введено в 1848 р. англійським фізиком В. Томсоном (Кельвіном) як параметр стану, що характеризує макроскопічну систему в стані термодинамічної рівноваги. Очевидно, що чим вище температура тіла, тим вище і цей параметр, званий значенням температури.

Для вимірювання температури тіла необхідно вибрати температурну шкалу з упорядкованою послідовністю значень температури. Побудова температурних шкал базується на реперних точках – відтворюваних з високою точністю значеннях температур. Діюча нині міжнародна практична шкала (МПТШ-68) має 11 реперних точок, якими є значення температури фазових переходів низки особливо чистих речовин, причому вони постійно уточнюються. Одиницею вимірювання температури у міжнародній практичній шкалі є кельвін (К).

Точність температурного контролю багато в чому визначає успіх процесу виробництва, якість одержуваної продукції. При цьому великий діапазон змінення температури, властивостей контрольованого середовища, вимоги точності вимірювання, економічні вимоги та інші обумовлюють необхідність застосування великої кількості методів і технічних засобів.

Для вимірювання температури можуть бути використані будь-які властивості твердих, рідких і газоподібних речовин, що змінюються залежно від температури. Деякі фізичні явища, які використовуються при вимірюванні температури, типи датчиків, в яких застосовуються ці явища, характерні для них діапазони вимірюваних температур наведено в табл. 5.1.

Усі методи температурних вимірювань поділяють на дві групи – контактні і безконтактні. У контактних передача тепла здійснюється контактним шляхом завдяки теплопровідності. Безконтактні методи основані на визначенні температури тіла за його випромінюванням.

На практиці широкого застосування набула обмежена кількість методів і відповідно приладів вимірювання температури. Найбільш поширені типи датчиків для вимірювання температури – термометри опору, термоелектричні перетворювачі (термопари), датчики, що працюють на явищі розширення-стиснення, розглянуто нижче.

Таблиця 5.1

Фізичні явища, типи датчиків температури
і діапазони їх вимірювання

Термометрична властивість		Тип датчика (термометра)	Діапазон вимірюваних температур, °С	
			Нижній	Верхній
Розширення-стиснення	рідини	Рідинно-скляний	Спирт: - 80	Ртуть: +750
	металів	Дилатометричний	-30	+1000
		Біметалічний	-60	+300
Змінення електричного опору	металів	Платиновий	-200	+1000
	напівпровідників	Термістори	170 К	570 К
		Позистори	+20	+100
Змінення тиску в замкнутому об'ємі	газів	Манометричний газовий	-150	+600
	рідин	Манометричний рідинний	-150	+300
	парорідинного середовища	Конденсаційний	-50	+300
Ефект Зеєбека (термоЕРС)	з'єднання двох різнорідних провідників	Термоелектричний перетворювач (термопара)	-272	+2500
Теплове випромінювання	радіаційне	Пірометр повного випромінювання	+400	+4000
	яскраве	Квазімонохроматичні пірометри	+800	+6000
	колірне	Пірометри спектрального відношення	+1500	+10000
Перетворення інфрачервоного випромінювання на видиме при зміненні інформації порядку телевізійної швидкості		Тепловізор	-50	+2000

5.2. Термометри опору

Принцип дії термометрів опору ($T_{\text{опор}}$) оснований на зміненні електричного опору провідників і напівпровідників при зміненні температури відповідно до залежності

$$R = R_0(1 + \alpha t),$$

де R – опір при температурі t , R_0 – опір при температурі $0\text{ }^\circ\text{C}$; α – температурний коефіцієнт опору (ТКО).

Характер змінення опору деяких $T_{\text{опор}}$ показано на рис. 5.1. Напівпровідники, які використовуються в $T_{\text{опор}}$, підрозділяються на термістори, що мають негативні ТКО, і позистори, що мають позитивний ТКО.

Для виготовлення чутливих елементів серійних термометрів опорів застосовуються чисті метали. Відносний опір деяких металів залежно від температури показано на рис. 5.2. Для вимірювання температури найчастіше застосовуються термометри опору типів ТОП (платинові) і ТОМ (мідні).

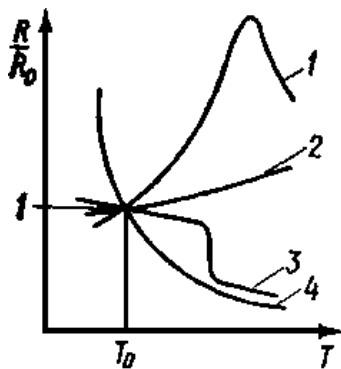


Рис. 5.1. Графік залежності опору різних $T_{\text{опор}}$ від температури: 1 – позистори; 2 – метали; 3 – електроліти; 4 – термістори

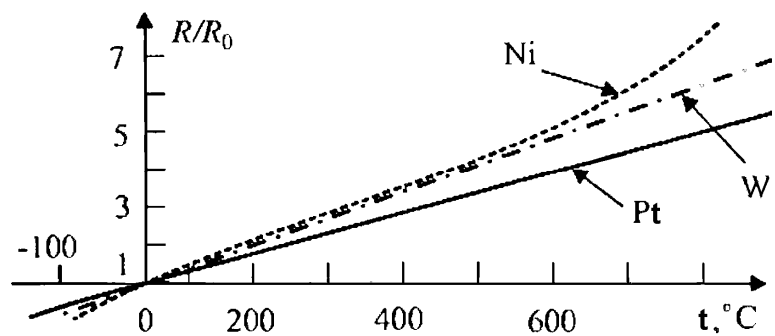


Рис. 5.2. Відносний опір деяких металів залежно від температури

Платинові ТОП широко використовуються у промислових умовах для вимірювань температур до $1100\text{ }^\circ\text{C}$. Вони технологічні, мають низьку вартість і забезпечують при лазерній пригонці точність $\pm 0,25\%$ в діапазоні температур $-200\dots 500\text{ }^\circ\text{C}$.

Для мідних $T_{\text{ОМ}}$ в діапазоні $-50\dots 200\text{ }^\circ\text{C}$ характерною є хороша лінійність залежності опору від температури. Застосування мідних $T_{\text{опор}}$ обмежена температурою $200\text{ }^\circ\text{C}$, оскільки при більш високих температурах мідь починає інтенсивне окиснюватися. Основні технічні характеристики платинових і мідних $T_{\text{опор}}$ наведено в табл. 5.2.

Чутливий елемент платинового ТОП виготовляють з відпаленого чистого платинового дроту діаметром $0,05\dots 0,2\text{ мм}$, скрученого в спіраль (рис. 5.3) і розміщеного в чотирьох каналах керамічного каркаса. Для вимірювання низьких і середніх температур каркаси чутливих елементів виготовляють зі скла з близьким до платини коефіцієнтом термічного розширення. Для вимірювання температур в діапазоні $630\dots 1100\text{ }^\circ\text{C}$ застосовується платиновий дріт діаметром $0,3\dots 0,6\text{ мм}$, оскільки дріт менших діаметрів піддається великому впливу сторонніх газів і парів. При цьому для каркаса використовується синтетичний сапфір.

Основні технічні характеристики $T_{\text{опор}}$

Тип $T_{\text{опор}}$	Номінальне значення опору при 0 °С, Ом	Умовне позначення НСХ	Клас допуску	Діапазон вимірюваних температур, °С
ТОП	1	Pt 1	В	0...1000
	10	Pt 10	А	- 200...750
	50	Pt 50	В	- 200...1000
	100	Pt 100	А	- 260...750
	500	Pt 500	В	- 200...300
ТСМ	10	Cu 10	В, С	- 50...200
	50	Cu 50	В, С	- 50...200
	100	Cu 100	В, С	- 200...200

У мідних ТОМ застосовується безкаркасна безіндуктивна обмотка, вміщена для стійкості в тонку металеву гільзу (рис. 5.4). Залежно від дійсних умов чутливі елементи можуть мати різну конструкцію – від стиснутої обмотки невеликої довжини для вимірювання температури підшипників до обмотки, розтягнутої на кілька метрів для вимірювання середньої температури нафти в резервуарах.

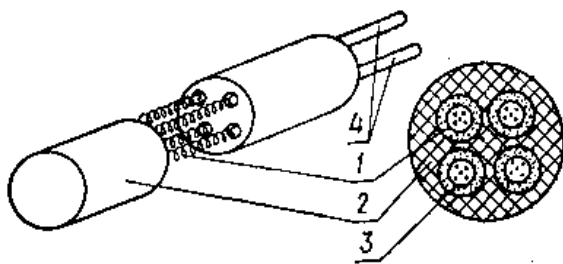


Рис. 5.3. Платиновий чутливий елемент ТОП: 1 – спіраль; 2 – каркас; 3 – порошок; 4 – виводи

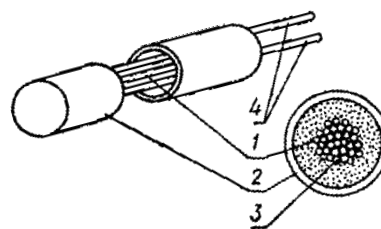


Рис. 5.4. Мідний чутливий елемент ТОМ: 1 – обмотка; 2 – гільза; 3 – керамічний порошок; 4 – виводи

Чутливий елемент технічних $T_{\text{опор}}$ поміщається в захисну арматуру з некородуючих сталей (наприклад, нержавіючої сталі 12Х18Н10Т) і за допомогою з'єднувальних проводів приєднується до вихідного розніму в пластмасовій головці. Внутрішня порожина захисної арматури заповнюється відпаленим порошком оксиду алюмінію і відділяється від навколишнього

середовища пробкою з вогнетривкої маси. Опір з'єднувальних проводів при 0 °С не має перевищувати 0,1 % опору чутливого елемента. Зовнішній вигляд одного з серійних $T_{\text{опор}}$ показано на рис. 5.5.

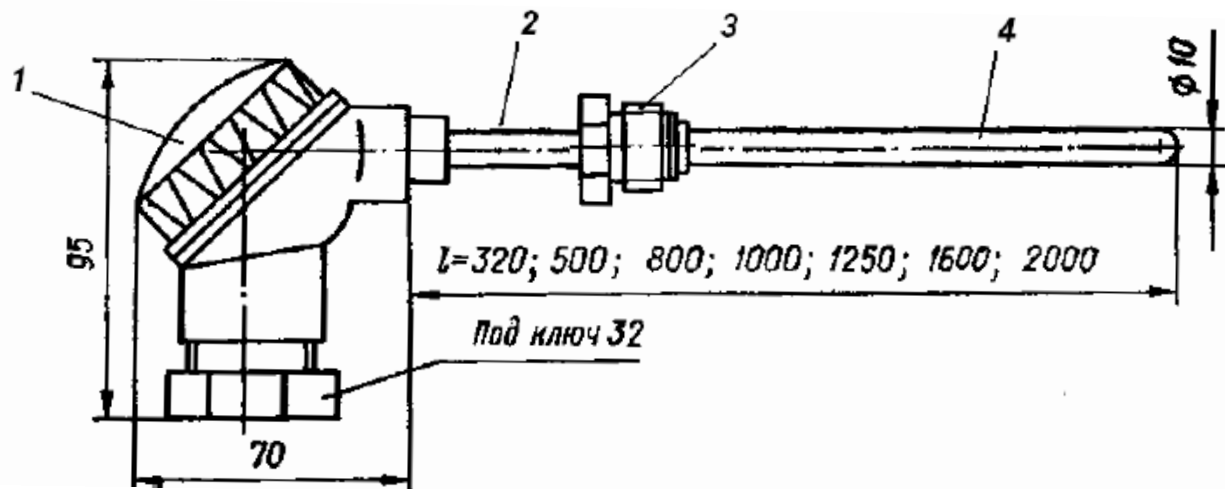


Рис. 5.5. Термоперетворювач опору з плаваючим штуцером для низьких тисків: 1 – головка; 2 – захисна арматура; 3 – плаваючий штуцер; 4 – чутливий елемент (під захисною арматурою)

Крім платини і міді в чутливих елементах $T_{\text{опор}}$ застосовують також залізо, нікель, вольфрам і деякі сплави.

Для усунення впливу температурної варіації опору $T_{\text{опор}}$ підключають за три- або чотирьопровідною схемою (рис. 5.6).

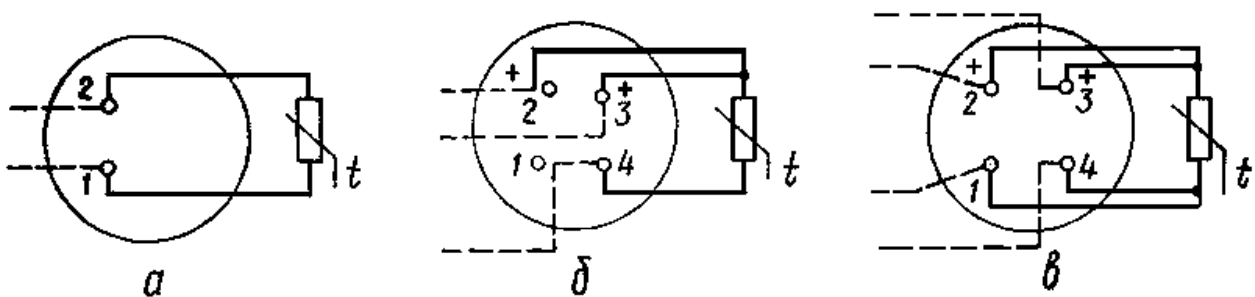


Рис. 5.6. Схема підключення термометра опору: а – за двопровідною схемою; б – за трипровідною; в – за чотирьопровідною

Вимірювання можна виконувати за допомогою вимірювального моста, підключивши $T_{\text{опор}}$ в одне з його плечей (рис. 5.7). При змінній температурі і відповідно $R_{T_{\text{опор}}}$ умова рівноваги моста $R_{T_{\text{опор}}} \cdot R_2 = R_1 \cdot R_3$, збалансованого при $t = 0$ °С, буде порушуватися. Неузгодженість плечей моста спричинить появу на вимірювальній діагоналі моста напруги $U_{\text{вих}}$, пропорційної зміненню температури.

Іншу типову схему вимірювання за допомогою $T_{\text{опор}}$ показано на рис. 5.8. Тут змінення сигналу на вході операційного підсилювача (ОП) становить $U_{\text{вх}} = IR(\alpha\Delta T)$, а вихідний сигнал буде пропорційним температурі $U_{\text{вих}} = kU_{\text{вх}}$, де k – коефіцієнт посилення ОП.

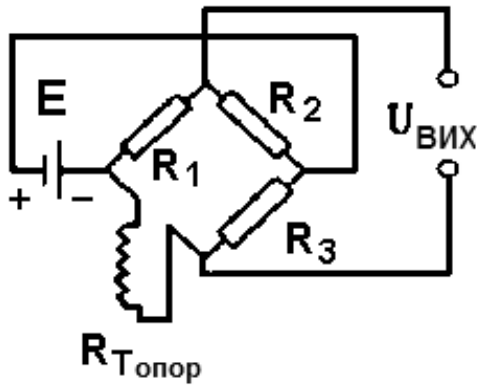


Рис. 5.7. Схема вимірювання температури $T_{\text{опор}}$ за допомогою вимірювального моста

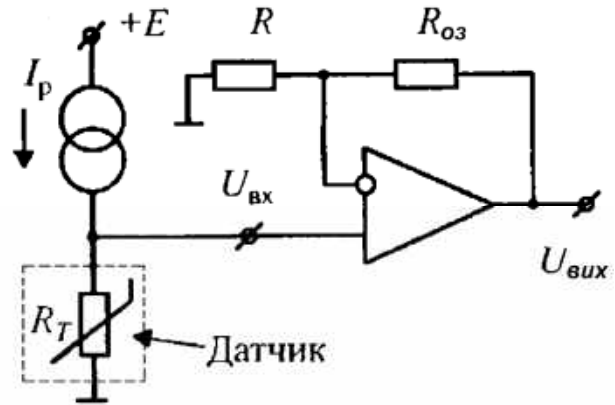


Рис. 5.8. Схема вимірювання температури $T_{\text{опор}}$ за допомогою операційного підсилювача

У багатьох областях техніки застосовуються терморезистивні датчики – терморезистори, що виготовляються з напівпровідникових матеріалів, оксидів і сульфатів металів. Такі терморезистори значно менше металевих термометрів опору, більш чутливі і менш інерційні. Вони виконуються у вигляді бусинок, таблеток, стрижнів, які можуть вбудовуватися в конструкції датчиків температури або безпосередньо в об'єкт, температуру якого потрібно контролювати.

На рис. 5.9, а показано конструкцію терморезистивного датчика ТМ100А, а на рис. 5.9, б – графіки залежності опору датчика від температури.

Корпус 1 датчика виконується у вигляді латунного балона з нарізкою і шестигранником під ключ для вкручування в місце вимірювання. Терморезистор 4 притиснутий до основи балона пружиною 3, яка здійснює одночасно підведення напруги. Пружина ізолюється від стінок балона ізоляційною втулкою, кінець її з'єднаний з виводом датчика. Внутрішню порожнину балона герметизовано, що робить конструкцію датчика нерозбірною. Такий датчик і аналогічні йому широко використовуються для контролю температури масла і охолоджувальної рідини у двигунах автомобілів.

Провідні світові компанії виробляють широкий спектр терморезистивних напівпровідникових датчиків для застосування в різних галузях промисловості. Наприклад, на рис. 5.10, а зображено датчик 702-101ВВВ-А00 (діапазон вимірювання – від -50 до 130 °С) виробництва фірми Honeywell International, на рис. 5.10, б – напівпровідниковий датчик температури

LM75A, що випускається фірмою NXP Semiconductors. Діапазон вимірювань цього датчика – від -55 до 130 °С.

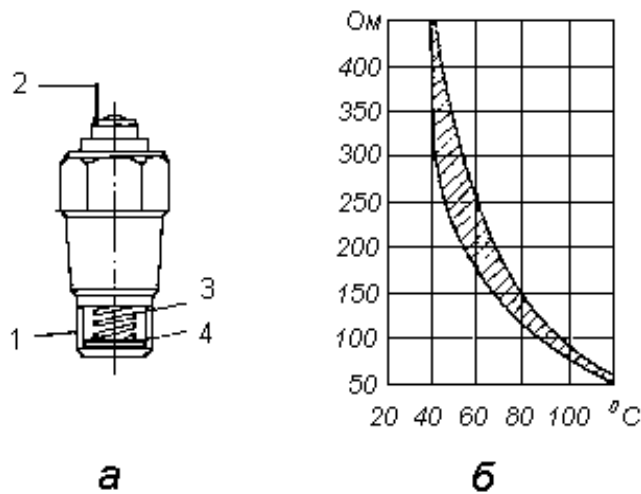


Рис. 5.9. Терморезистивний датчик ТМ100А (а) і графіки залежності опору датчика від температури (б):
1 – корпус; 2 – вивід;
3 – пружина; 4 – терморезистор

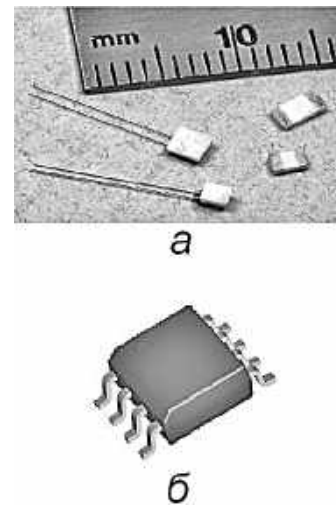


Рис. 5.10. Терморезистивні напівпровідникові датчики:
а – датчик 702-101BBB-A00;
б – датчик LM 75А

5.3. Термоелектричні датчики (термопари)

Термопара – два провідника з різнорідних матеріалів, з'єднаних на одному кінці і які утворюють частину пристрою, що використовує термоелектричний ефект для вимірювання температури.

Дія датчиків такого типу основана на явищі термоелектричного ефекту (ефекту Зеебека). Суть ефекту полягає у виникненні ЕРС на вільних («холодних») кінцях різнорідних провідників при нагріванні інших кінців («гарячих»), які з'єднані між собою (рис. 5.11, а). Величина термоЕРС залежить від матеріалу провідників і різниці температур з'єднаних і вільних кінців. Два таких з'єднаних (зварених) одними кінцями різнорідних провідники називають термопарою.

Для виготовлення термопар (ТермоП) застосовують різноманітні матеріали, вибір яких у кожному конкретному випадку визначається такими показниками: механічна і хімічна стійкість у необхідному температурному діапазоні; хороша електропровідність; сталість термоелектричних властивостей; однозначна залежність термоЕРС від температури; максимальна крутість передавальної характеристики термопари.

Порівняння термочутливості матеріалів проводять за утворюваною термоЕРС у парі з платиною (взятої за еталон) при температурі вільних кінців $t_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ і з'єднаних інших при $t_1 = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Основні технічні характеристики найбільш часто використовуваних термопар наведено в табл. 5.3.

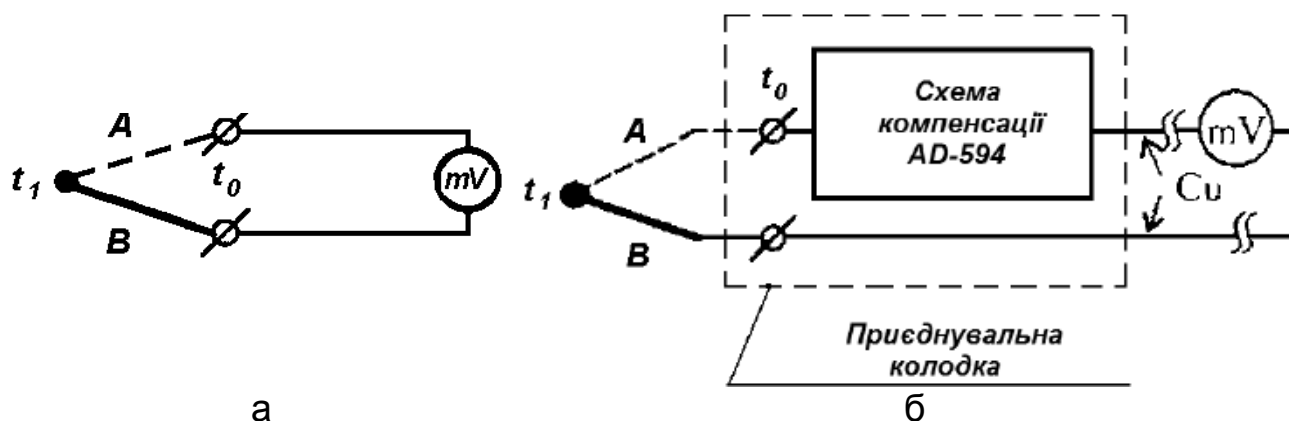


Рис. 5.11. Схеми підключення термопар: а – звичайне; б – з активною компенсацією паразитної термоЕРС

Таблиця 5.3

Основні технічні характеристики термоелектричних термометрів

Матеріал термопари	Тип термопари	Крутість, мкВ/°С	Робочий/максимальний діапазон, °С
Платинородій (10 %) – платина	ТПП (S)	-10	0...-1300 / 1600
Платинородій (13 %) – платина	ТПП (R)	-10	0...-1500 / 1700
Платинородій (30 %) – платинородій (6 %)	ТПР (B) в	- 4	0...1700/1800
Мідь – мідно-нікелевий сплав	МК (T)	- 40	- 200...400/-
Вольфраморенієві сплави (BP 10/20)	–	- 20	0 ... 2200/2500
Хромель – константан	ХК (E)	- 80	- 270...700/870
Хромель – копель	ХК (L)	- 80	0...600/1800
Хромель – алюмель	ХА (K)	- 40	- 200...900/1200
Залізо – константан	ТЖК (J)	- 65	200...800/1200

Залежність ЕРС термопари від температури з'єднаних елементів при постійній температурі вільних кінців визначається шляхом градуювання. Градувальні характеристики термопар, поданих в табл. 5.3, зображено на рис. 5.12. За наявності таких характеристик можна за вимірюваним значенням ЕРС термопари визначити температуру її з'єднаних елементів, які поміщаються в досліджуване середовище, тобто визначити температуру самого середовища.

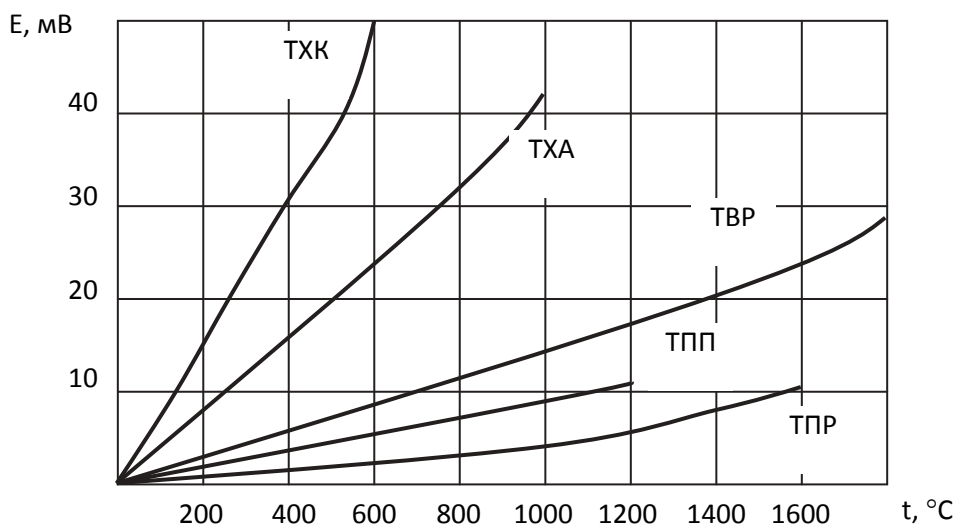


Рис. 5.12. Градувальні криві термопар

Зазвичай термопары градууються при температурі вільних кінців, що дорівнює нулю. Якщо ж термопара працює в умовах, коли температура вільних кінців відрізняється від нуля, то з'являється похибка вимірювання температури. Крім того, якщо матеріали проводів і з'єднанні з ними матеріали електродів термопар різноманітні, то в місцях з'єднання також буде виникати термоЕРС, величина якої залежить від температури середовища, що оточує виводи. У підсумку термоЕРС, що виникає на вільних кінцях термопар, буде складатися з основної термоЕРС, яка характеризує вимірювану температуру, та термоЕРС, яка виникає в місцях з'єднання. Це призводить до похибок при вимірюваннях.

У реальних умовах фіксувати температуру холодного спаю важко, тому її враховують або компенсують. Наприклад, для активної компенсації похибки, яка виникає в термопарі «залізо-константан» фірмою Analog Device розроблено мікросхему AD-594, що дозволяє вимірювати температуру в діапазоні 0...300 °C з похибкою $\Delta T = \pm 0,6$ °C і крутістю перетворення 10 мВ/град. Схему підключення мікросхеми показано на рис. 5.11, б.

Конструктивне виконання термопар різноманітне і залежить головним чином від умов їх застосування. Для вимірювання температур у промисловості зазвичай використовують конструкцію, показану на рис. 5.13, 5.14, б. У цьому випадку вимірювальний спай термопар 1 надійно захищений від механічних і агресивних впливів середовища корпусом 2. Однак такі ТермоП мають більшу інерційність (стала часу досягає десятків секунд) порівняно з ТермоП, що мають відкритий спай (рис. 5.14, а). Габаритні розміри ТермоП становлять: $d=2,5\text{...}10$ мм, $L=40\text{...}1000$ мм, $l=20\text{...}50$ мм.

У цілому чутливість термопар значно менше, ніж у термометрів опору, і на два порядки менше, ніж у терморезисторів, але вони можуть працювати у важчих умовах. При цьому, незважаючи на хорошу роздільну здатність і точність вимірювань, вартість термопар відносно невелика.

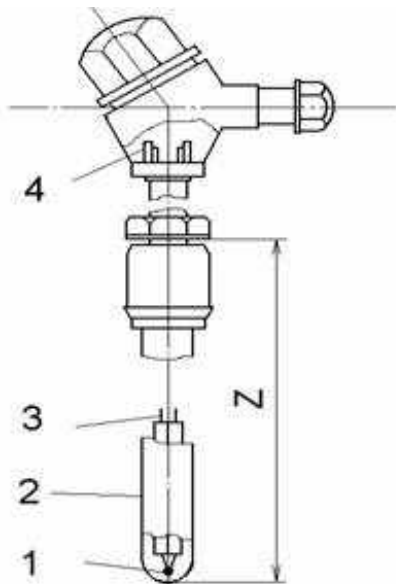


Рис. 5.13. Конструкція промислової термопари: 1 – зварений кінець термопари; 2 – корпус; 3 – термоелектроди; 4 – виводи

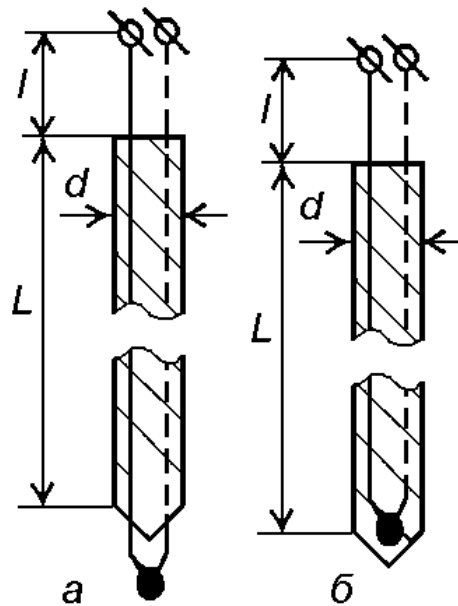


Рис. 5.14. Варіанти розміщення спаяної термопари: а – поза корпусом; б – у корпусі

5.4. Термометри, основані на принципі розширення-стиснення речовини

До приладів, в яких використовується властивість розширення-стиснення речовини, належать рідинно-скляні термометри, основані на зміні об'єму рідини, і дилатометричні та біметалічні термометри, які змінюють свої лінійні розміри зі зміненням температури. Прилади цієї групи широко застосовуються у найпростіших схемах регулювання температури як теплові реле.

У першому наближенні змінення об'єму і лінійних розмірів твердих і рідких тіл визначається залежностями

$$V_t = V_0(1 + \beta t) \text{ і } l_t = l_0(1 + \alpha t),$$

де V_t і l_t – об'єм і довжина тіла при температурі t ; V_0 і l_0 – об'єм і довжина тіла при 0°C ; α і β – коефіцієнти лінійного і об'ємного розширення.

Термометри ртутні електроконтактні застосовують у схемах сигналізації і для регулювання температури за різних умов. Їх виготовляють з постійними впаяними контактами (тип ПЕК) або з одним рухомим контактом, який можна переміщувати всередині капіляра за допомогою спеціального магнітного пристрою, і другим нерухомим контактом, впаяним у капіляр термометра (тип ТПК). Замикання (розмикання) електричного кола між контактами в обох випадках відбувається через розширення (стиснення) ртуті при нагріванні (охолодженні) нижньої частини термометра. Прос-

тір над ртуттю в капілярі заповнюють воднем, попередньо очищеним від вологи і кисню.

При установленні термометрів безпосередньо в технологічні об'єкти (апарати, агрегати, трубопроводи і т. п.) їх укладають у захисну оправу, щоб уникнути поломок. Такі термометри можуть працювати у ланцюгах постійного і змінного струму.

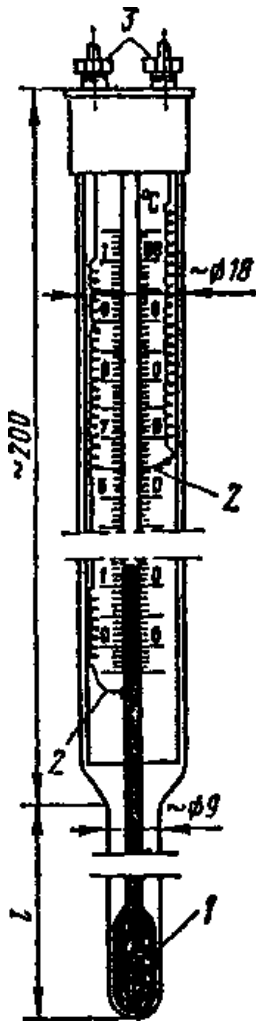


Рис. 5.15. Термометр ртутний електроконтактний типу ПЕК: 1 – резервуар зі ртуттю; 2 – контакти, впаяні в капіляр; 3 – вихідні затискачі

Термометр ртутний електроконтактний типу ПЕК показано на рис. 5.15. Для термометрів типу ПЕК в інтервалі температур від -35 до 300 °С може бути одне, два або три заданих значень температури спрацьовування. Контакти 2 впаяються в капіляр термометра у місцях, які відповідають заданим значенням температур спрацьовування, які визначаються вимогами технологічного процесу. Контакти за допомогою мідних проводів приєднані до затискачів 3, змонтованих на корпусі термометра. Електроконтактні термометри використовують, зокрема, для сигналізації робочої температури підшипників двигунів та інших машин, при цьому температуру спрацьовування вибирають зазвичай такою, що дорівнює 65 °С.

Конструктивне виконання дилатометричних термометрів ґрунтується на перетворенні вимірюваної температури на різницю абсолютних значень подовжень двох тіл, виготовлених з матеріалів з істотно різними термічними коефіцієнтами лінійного розширення.

Прикладом дилатометричного пристрою є реле температури типу РТ-300, зображене на рис. 5.16. Це реле може бути використано для регулювання температури в діапазоні від 100 до 300 °С як первинний перетворювач.

Чутливим елементами реле є трубка 1 і пружина контактної пристрою 2. Матеріал трубки порівняно з матеріалом пружини має більший коефіцієнт лінійного розширення.

При нагріванні трубка подовжується і пов'язаний з нею упор 3 переміщується відносно пружини, що приводить до зменшення зазору Δl , який встановлюється залежно від заданого значення температури за допомогою регульовального гвинта 4.

При досягненні заданого значення температури середовища зазор Δl повністю усувається, а подальше підвищення температури спричиняє розтягнення пружини і, отже, розмикання контактів 5. Зниження температури середовища приводить до зменшення довжини трубки і повернення пружини у початкове положення. При цьому контакти знову замикаються. Вузол задавального пристрою температур забезпечено шкалою, що полегшує регулювання зазору Δl . Похибка спрацьовування контактів не перевищує $\pm 5^\circ\text{C}$.

Дія біметалевих термометрів основана на деформації біметалевої пластини (стрічки) при зміні температури. Біметалева пластина складається з двох шарів різнорідних металів, що мають різні коефіцієнти лінійного розширення (наприклад, інвар – латунь, інвар – сталь), зварених по всій площині дотику. Різниця коефіцієнтів лінійного розширення металевих пластин призводить до деформації пластини при її нагріванні або охолодженні.

Біметалеве температурне реле показано на рис. 5.17.

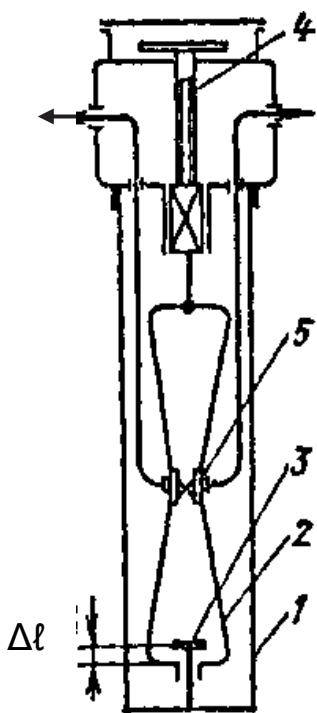


Рис. 5.16. Реле температури РТ-300: 1 – трубка; 2 – пружина; 3 – упор; 4 – регулювальний гвинт; 5 – контакти

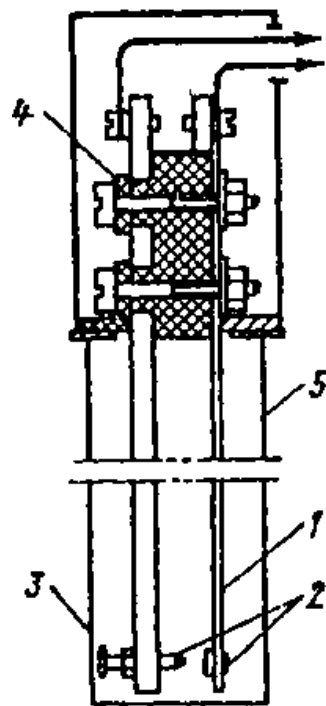


Рис. 5.17. Біметалеве температурне реле: 1 – термобіметалева пластина; 2 – контакти; 3 – регулювальний гвинт; 4 – ізолятор; 5 – захисна гільза

При нагріванні термобіметалевої пластини 1 вона згинається у бік металу з меншим коефіцієнтом лінійного розширення (інвару) і при заданій температурі замикає контакти 2. Регулювання зазору між контактами на задане значення температури здійснюється гвинтом 3 в однорідній мета-

лівій пластині, яка, як і термобіметалева, кріпиться до ізолятора 4. Для захисту пластин вони поміщені у захисну гільзу 5.

Область застосування біметалевих температурних реле визначається інтервалом температур: від -60 до 300 °С залежно від марки використовуваного біметалу. Вони прості й дешеві у виготовленні, тому широко застосовуються для регулювання температури у побутових приладах. Біметалеві термометри забезпечують змінення температури з відносними похибками 1...1,5 %.

5.5. Основні рекомендації щодо вибору датчиків температури

Вибір датчика для використання у складі системи керування температурним режимом технологічного об'єкта складається з декількох етапів.

1. Визначають діапазон регулювання температур (мінімальне і максимальне значення) і підбирають типи датчиків, що працюють у цьому діапазоні, на підставі аналізу температурних режимів технологічного об'єкта.

2. Визначають, чи може датчик контактувати із середовищем, температура якого вимірюється (бути зануреним у вимірюване середовище або об'єкт). Якщо розташування всередині робочого середовища є неприпустимим, то слід вибирати прилади безконтактного типу (наприклад, акустичні термометри і пірометри).

3. Аналізують інші умови вимірювань – вид середовища (агресивне або інертне), його вологість, тиск і т. п. Якщо використовується агресивне середовище, то необхідно застосовувати або датчики у корозійних захисних корпусах (наприклад, з нержавіючої сталі), або безконтактні датчики.

4. Визначають, як довго датчик буде працювати без заміни та калібрування. Деякі типи датчиків мають відносно низьку довгострокову стабільність (наприклад, термістори).

5. Визначають метрологічні характеристики датчика (необхідне температурне розділення датчика і його похибку), виходячи з вимог забезпечення якості технологічного процесу.

Датчик підбирають за параметрами вихідного сигналу для узгодження рівнів і типів сигналів – вихідного сигналу датчика температури і вхідного системи керування з урахуванням того, що деякі датчики видають струмовий вихідний сигнал, інші – показують величину напруги, а інтелектуальні можуть автоматично перераховувати його в градуси. При виборі датчика температури для конкретного технологічного процесу необхідно іноді враховувати і такі технічні характеристики, як напруга живлення, інерційність датчика, габарити (тип корпусу) та ін.

6. ПРИСТРОЇ ЗВ'ЯЗКУ З ОБ'ЄКТАМИ

Датчики, що вимірюють технологічні параметри реального промислового об'єкта, практично завжди розташовуються на самому об'єкті. Тут розміщуються і виконавчі механізми, що здійснюють регулювання технологічних параметрів. При цьому системи керування, що виконують оброблення інформації від датчиків і виробляють керувальний сигнал для виконавчих механізмів, зазвичай виходять за межі технологічного об'єкта на відстань, яка може варіюватися від декількох метрів до декількох тисяч метрів. Для передачі інформації від датчиків до системи керування, а від неї до виконавчих пристроїв застосовуються пристрої зв'язку з об'єктами (ПЗО), в найпростішому випадку – це звичайна провідна лінія зв'язку. Для уявлення місця ПЗО в процесі автоматизації виробництва подібні системи можна зобразити у вигляді схеми, показаної на рис. 6.1.

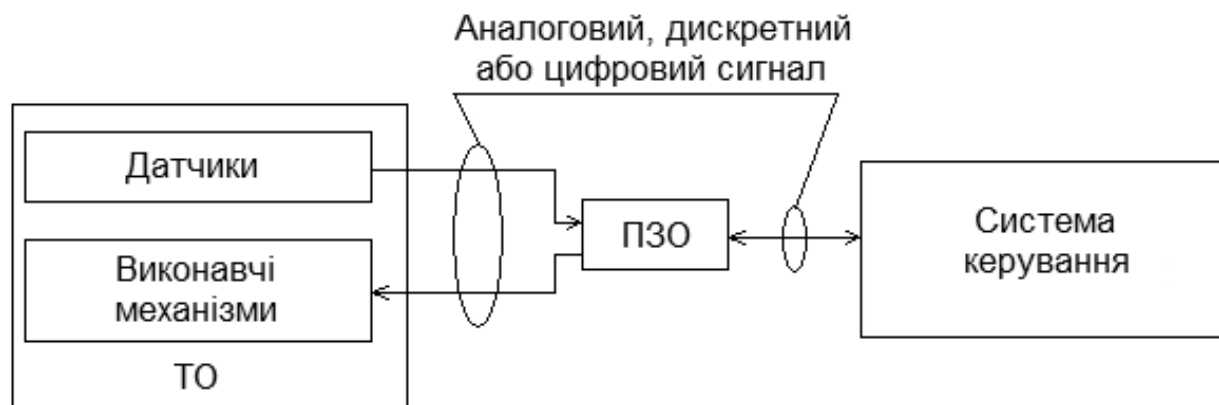


Рис. 6.1. Місце ПЗО у процесі автоматизації виробництва

Залежно від складності технологічного об'єкта, типів використовуваних датчиків, видів їх вихідних сигналів, віддаленості системи керування, застосовуваних засобів регулювання технологічних параметрів (виконавчих механізмів) визначається коло завдань, що вирішуються ПЗО.

1. Нормалізація аналогового сигналу – зведення меж шкали первинного безперервного сигналу до одного зі стандартних діапазонів вхідного сигналу аналого-цифрового перетворювача вимірювального каналу. Найбільш поширені діапазони напруг: 0...5; -5...5; 0...10 В і струмів: 0...5; 0...20; 4...20 і 1...5 мА.

2. Аналого-цифрове і цифро-аналогове перетворення сигналу, а також дискретне введення-виведення інформації.

3. Перетворення кодів (коду Грея – на двійковий, двійкового – на двійково-десятковий і т. п.).

4. Забезпечення перешкодозахищеності ліній зв'язку – апаратне і за допомогою перешкодостійкого кодування (перетворення двійкового коду на код Хеммінга, код Манчестер-II та ін.).

5. Забезпечення гальванічної розв'язки (ізоляції) між джерелами сигналу і каналами системи.

6. Створення засобів організації одного з інтерфейсів послідовної передачі даних.

Надалі як ПЗО будемо розглядати модулі, плати та інші пристрої, призначені для вирішення перелічених вище завдань.

6.1. Підсилення (нормалізація) вихідних сигналів датчиків

Для підсилення вихідних сигналів датчиків і їх нормування широко використовують операційні підсилювачі (ОП).

Операційний підсилювач – це підсилювач постійного струму з великим коефіцієнтом підсилення. Термін «операційний підсилювач» пов'язаний з первісним використанням підсилювачів з високим коефіцієнтом підсилення для виконання математичних операцій в аналогових обчислювальних машинах. Сучасні операційні підсилювачі випускаються у вигляді інтегральних мікросхем (ІМС), параметри і схеми підключення яких досить докладно описано в навчальній і довідковій літературі [2, 16 – 18, 22].

Умовне позначення типового ОП показано на рис. 6.2, а. Операційні підсилювачі виготовляються в корпусах різних типів – циліндричних і прямокутних з різною кількістю виводів. На рис. 6.2, б показано 8-вивідний тип корпусу.

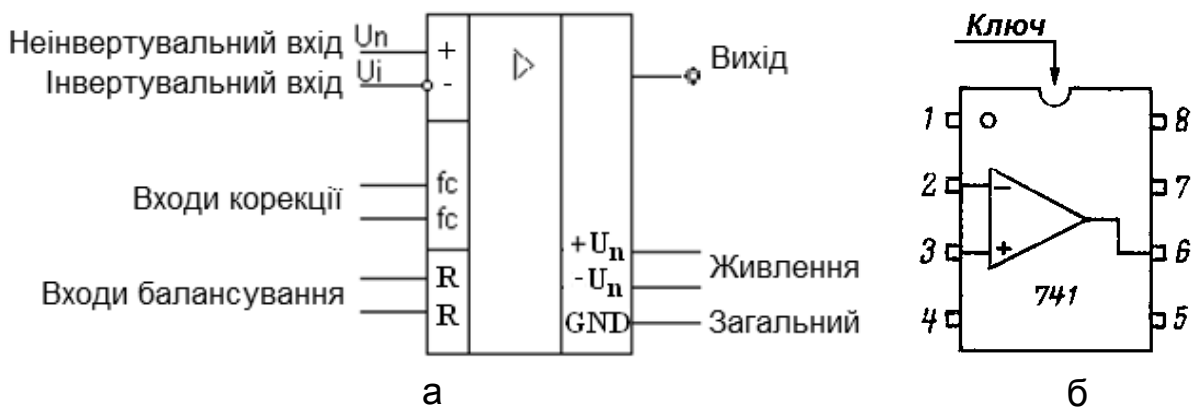


Рис. 6.2. Умовне графічне позначення операційного підсилювача (а) і 8-вивідний тип корпусу (б)

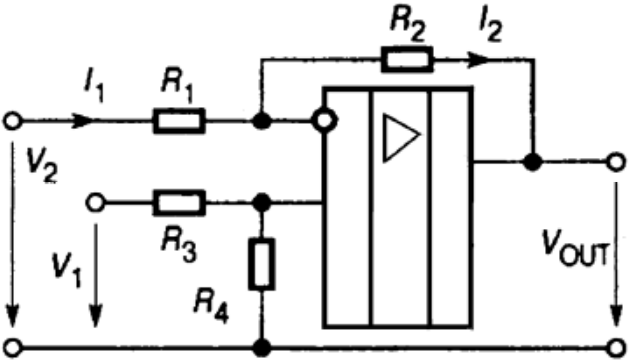
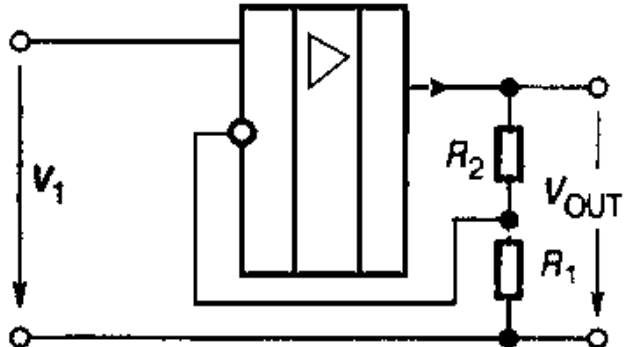
Усі ОП мають диференціальний вхід, виконаний як два незалежні входи: неінвертувальний (прямий) та інвертувальний. Посиленню піддається різниця напруг, прикладених до входів, тобто $U_{вих} = K(U_n - U_i)$, де K – коефіцієнт підсилення (зазвичай $K = 10^5 \dots 10^7$). Входи корекції, балансування, загальний вивід у деяких типів інтегральних ОП відсутні. При використанні ОП необхідно застосовувати прийнятні схеми підключення мікросхем.

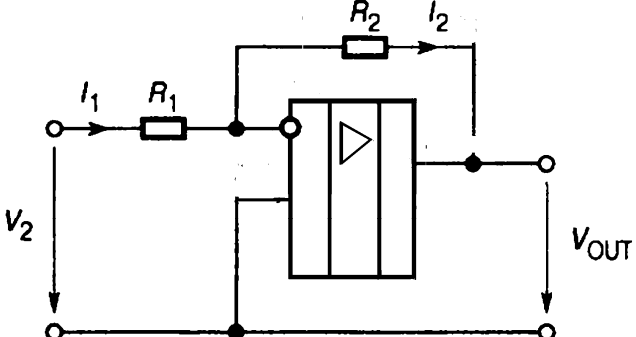
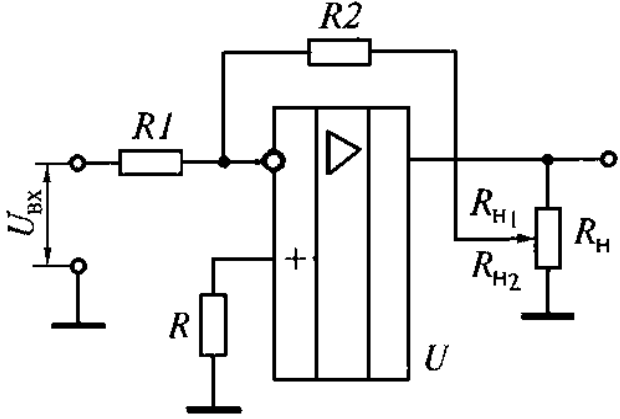
Як джерела живлення ОП зазвичай використовують біполярне джерело напруги (+Uп, -Uп), середній вивід якого є спільною шиною для входних і вихідних сигналів. У реальних ОП напруга живлення лежить в діапазоні ± 3...18 В.

У зв'язку з великим коефіцієнтом підсилення схеми ОП охоплюють ланцюжками зворотних зв'язків (ЗЗ). Зв'язок виходу ОП з інвертувальним входом вважається негативним зворотним зв'язком (НЗЗ), а зв'язок виходу з неінвертувальним входом – позитивним зворотним зв'язком (ПЗЗ). Операційні підсилювачі з НЗЗ використовуються як лінійні підсилювальні елементи, ОП з ПЗЗ – як нелінійні елементи. Основні схеми підключення ОП подано в табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Основні схеми підключення операційних підсилювачів

Принципова схема	Основні співвідношення
<p data-bbox="331 943 625 1025">Диференціальне підключення</p> 	$V_{OUT} = \frac{(R_1 + R_2)R_4}{R_1(R_3 + R_4)} V_1 - \frac{R_2}{R_1} V_2$
<p data-bbox="331 1498 625 1581">Неінвертувальне підключення</p> 	$K = \frac{V_{OUT}}{V_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$

Принципова схема	Основні співвідношення
<p data-bbox="379 309 632 383">Інвертувальне підключення</p> 	$K = \frac{V_{OUT}}{V_2} = -\frac{R_2}{R_1}$
<p data-bbox="300 815 708 889">ОП зі змінним коефіцієнтом підсилення</p> 	<p data-bbox="1050 1025 1193 1066"><i>K – var</i></p>

Усі ОП мають корекцію амплітудно-частотної характеристики (АЧХ). Ця корекція може бути як внутрішньою, так і зовнішньою. В останньому випадку до відповідних виводів ОП (рис. 6.2, а) підключаються пасивні зовнішні елементи – зазвичай резистори і ємності.

Поряд з корекцією АЧХ важливе значення має балансування ОП, що являє собою операцію з компенсації напруги зміщення в ОП. Балансування проводиться за допомогою багатооборотного потенціометра, початок і кінець якого підключені до входів R ОП (рис. 6.2, а), а середній вивід – до джерела живлення. Для балансування вводи ОП заземляють, і за допомогою багатооборотного потенціометра встановлюється напруга $U_{\text{вих}} = 0$. Балансування дозволяє компенсувати напругу зміщення ОП у певний момент при діючих дестабілізуювальних факторах. При зміні параметрів живлячих напруг і зовнішніх чинників, таких як температура і вологість навколишнього середовища, балансування порушується і його необхідно

періодично повторювати. Тому іноді застосовується автоматичне установлення нулів ОП.

Відповідно до ГОСТ 4.465–86 усі ОП за сукупністю їх параметрів і призначенням поділяють на такі групи:

- універсальні (або ОП загального застосування) – К140УД1А та ін.;
- прецизійні (високоточні) – К140УД21, К140У24 та ін.;
- потужні і високовольтні – К157УД1, К1408УД1, К1422УД1;
- швидкодіючі – К140УД10, К140УД11, К544УД2, К574УД2;
- мікропотужні – К140УД12, К153УД4, К1401УД3;
- багатоканальні – К140УД20, К1401УД1, К1407УД2;
- з великим вхідним опором – К140УД8, К544УД2 та ін.

Універсальні ОП використовують для створення електронних схем, що мають сумарну зведену похибку близько 1 % і характеризуються відносно малою вартістю і середнім рівнем параметрів.

Прецизійні ОП застосовують для підсилення малих сигналів, вони характеризуються малими значеннями напруги зміщення і його температурним дрейфом, великими коефіцієнтами підсилення і вхідним опором, а також низьким рівнем шумів.

У потужних і високовольтних ОП вихідний струм може досягати значень одиниць і десятків ампер, а вихідна напруга – сотень вольт.

Швидкодіючі ОП мають хороші динамічні характеристики і використовуються для перетворення високочастотних сигналів, мають високу швидкість збільшення вихідного сигналу, малий час установлення, високу частоту одиничного підсилення.

Мікропотужні ОП відрізняються мінімальним споживаним струмом, який у деяких різновидах ОП можна регулювати за допомогою зовнішнього резистора. Такі ОП називаються програмованими і широко використовуються в автономній апаратурі, де найважливішим параметром є мінімальна споживана потужність.

Багатоканальні ОП являють собою кілька ОП (зазвичай два або чотири), розміщених в одному корпусі, які застосовуються для зниження масогабаритних показників.

Окрему групу ОП становлять підсилювачі з великим вхідним опором. Їх високий вхідний опір (10 МОм і більше) обумовлено застосуванням у першому каскаді польових транзисторів, у яких вхідний струм не перевищує 100 нА. Для отримання малого значення вхідного струму можуть також застосовуватися так звані супербета-транзистори, в яких коефіцієнт посилення за струмом перевищує 5000.

Деякі ОП можуть мати захист від короткого замикання на вході і виході, наприклад К140УД7 з вбудованою внутрішньою корекцією АЧХ і захистом входу і виходу від короткого замикання і установленням нуля.

Нині ОП є основними елементами для побудови аналогових та імпульсних схем: повторювачів, масштабних підсилювачів, інтеграторів,

суматорів, функціональних перетворювачів, стабілізаторів струму і напруги, активних фільтрів, підсилювачів змінного струму, генераторів імпульсів, схем порівняння і т. п.

Як приклад застосування ОП для нормування сигналу датчика на рис. 6.3 показано електричну схему на базі ОП для посилення сигналу, що знімається з термопари. В основу підсилювача покладено схему з технічного опису фірми Analog Devices на операційний підсилювач OP213. Цей ОП можна віднести до точних приладів з малим тепловим дрейфом нуля.

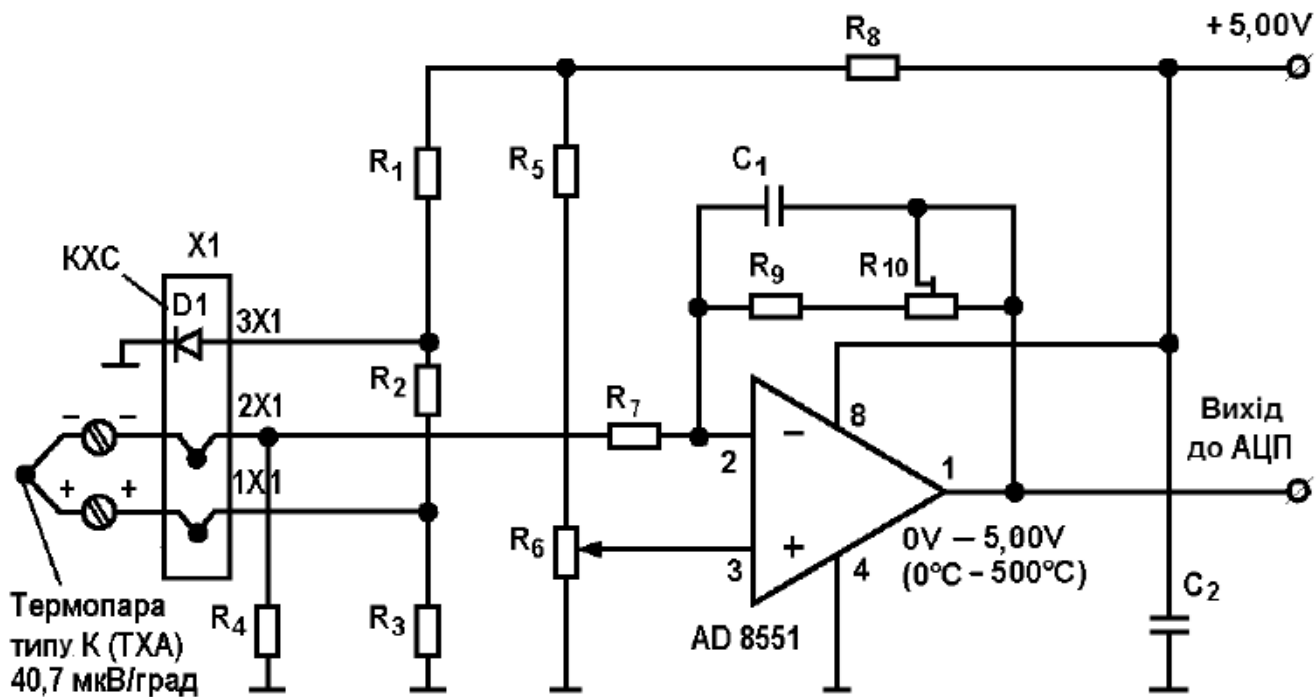


Рис. 6.3. Прецизійний підсилювач термоЕРС з компенсацією температури холодного спаю

Прецизійний підсилювач ЕРС термопари, виконаний на ОП AD8551, може забезпечити точність вимірювання $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$ в діапазоні температур від 0 до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Залежність струму рп-переходу діода D1 від температури у цьому випадку використовується для компенсації температури холодного спаю термопари. Тому діод має бути поміщений як можна ближче до контактів підключення термопари в коробці холодних спаїв (КХС). При градуванні термопари її вимірювальний спай має бути занурений в крижану баню (лід з водою). Змінним резистором R6 в схемі здійснюють балансування опорної напруги ОП (установлення нуля), а підстроювальним резистором R10 коректують коефіцієнт посилення залежно від застосовуваної термопари (коригування максимального значення температури). З деяким погіршенням параметрів схеми можна застосовувати ОП LM358, TL3472C або WT272C.

6.2. Методи і пристрої аналого-цифрового і цифро-аналогового перетворень

Первинна інформація про різні фізичні величини і процеси, що змінюються в основному безперервно, має безперервний, або аналоговий, характер. Для оброблення цієї інформації у цифровій системі керування необхідно попередньо перетворити її на цифрову форму. Це завдання виконує аналого-цифровий перетворювач (АЦП, англ. ADC – Analog Digital Converter). АЦП входять до складу багатьох інформаційно-вимірювальних пристроїв і комплексів.

З іншого боку, керувальні сигнали, що виробляються системою керування, мають цифровий характер, тоді як багато виконавчих механізмів і регулювальних органів потребують для керування аналогового сигналу. Завдання перетворення цифрового сигналу на аналоговий виконують цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП, англ. DAC – Digital Analog Converter).

6.2.1. Аналого-цифрові перетворювачі

Аналого-цифровий перетворювач – це пристрій, призначений для перетворення безперервно змінюваної у часі фізичної величини на еквівалентні їй значення цифрових кодів. Як аналогова величина можуть бути напруга, струм, кутове переміщення, тиск газу і т. д.

Процес аналого-цифрового перетворення передбачає послідовне виконання таких етапів:

- дискретизація сигналу в часі;
- квантування вихідної аналогової величини за рівнем;
- кодування – замінення знайдених квантових значень деякими числовими кодами.

Дискретизацією сигналу в часі називається вибірка миттєвих відліків безперервного сигналу $f(t)$ з рівними інтервалами часу Δt між ними (рис. 6.4). Крок дискретизації, при якому первісна функція $f(t)$ може бути відновлена без втрати інформації, визначають за теоремою Котельникова

$$\Delta t = 1 / 2F ,$$

де F – найбільша частота спектра аналогового сигналу.

Квантування сигналу за рівнем полягає в заміненні нескінченної кількості його значень на деяку скінченну безліч значень, які називаються рівнями квантування. Для виконання цієї операції увесь діапазон змінення функції $f(t)$ від мінімального (f_{min}) до максимального (f_{max}) значень поділяють на декілька рівнів N і проводять округлення кожного значення цієї функції до найближчого рівня квантування.

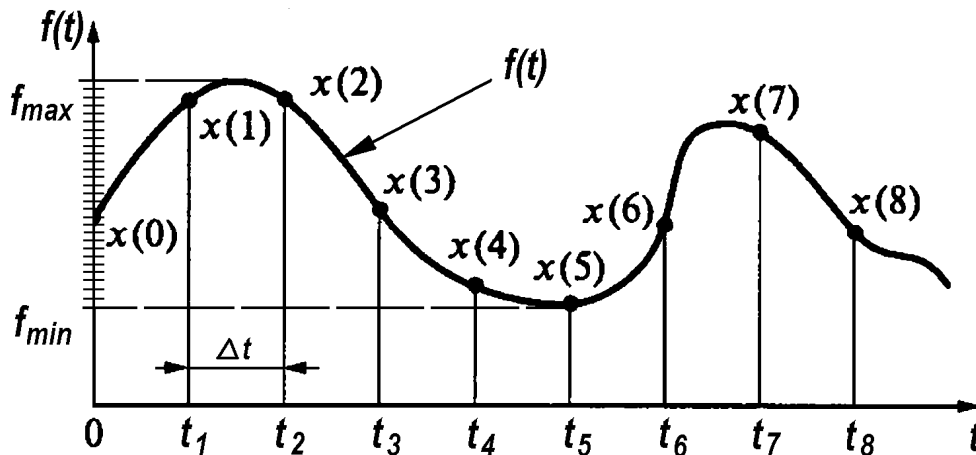


Рис. 6.4. Етапи перетворення аналогового сигналу на цифровий

На останньому етапі аналого-цифрового перетворення виконується кодування – операція замінення знайдених квантових значень числовими (зазвичай двійковими) кодами.

Основними параметрами АЦП є:

- розрядність – параметр, що визначає максимальне двійкове число на виході; найбільш поширеними є 6-, 8-, 10- і 12-розрядні АЦП;

- роздільна здатність (resolution) – величина, обернена максимальній кількості кодових комбінацій на виході АЦП, що виражається зазвичай у відсотках або розрядах і характеризує можливості АЦП з погляду точності перетворення. Наприклад, 12-розрядний АЦП має роздільну здатність $1/4096$ (0,0245 % від повної шкали);

- робоча смуга частот – номінальний діапазон частот вхідного сигналу, заданий розробником приладу, в якому при певній частоті дискретизації нормуються метрологічні характеристики аналого-цифрового перетворення;

- швидкість перетворення – кількість вибірок у секунду.

До складу АЦП часто входять допоміжні вузли, що істотно поліпшують метрологічні характеристики і розширюють функціональні можливості АЦП, – буферні підсилювачі, автоматичні перемикачі діапазонів, програмовані підсилювачі, пристрої вибірки-зберігання, схеми автокалібрування і автопідстроювання, екстраполятор, оперативні та постійні запам'ятовуючі пристрої, цифрові фільтри та ін. Практично всі сучасні АЦП орієнтовані на спільну роботу з мікропроцесорними системами і містять елементи інтерфейсу (буферні регістри, дешифратори адреси і т. п.).

Усе різноманіття схем АЦП за принципом (методом) перетворення можна поділити на такі основні групи:

- паралельні перетворювачі;
- перетворювачі послідовного наближення;
- послідовні (конвеєрні) перетворювачі.

Крім зазначених можна виділити сигма-дельта-перетворювачі, які ні ні вважаються найбільш економічними схемами з високою роздільною здатністю.

Перетворення аналогового сигналу на цифровий розглянемо на прикладі швидкодіючого паралельного АЦП, схему якого зображено на рис. 6.5.

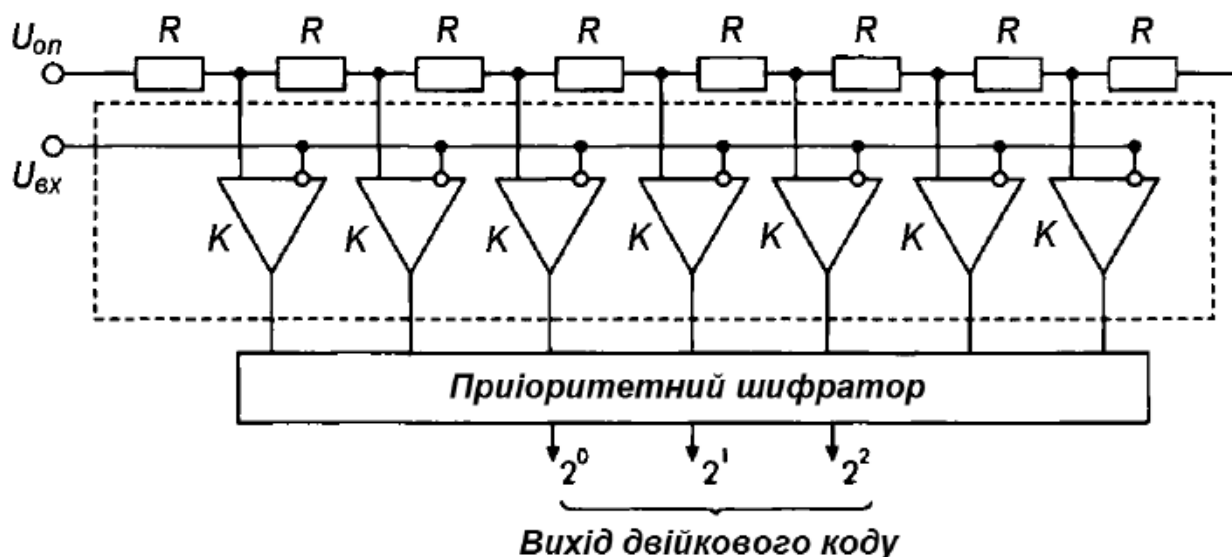


Рис. 6.5. Схема паралельного АЦП

АЦП паралельного типу містить подільник, що складається з набору послідовно підключених резисторів з однаковим опором R , компараторів K і кодувальної логіки (пріоритетний шифратор). На один зі входів кожного компаратора подається опорна напруга, яка збільшується від $U_{оп}/2N$ до $U_{оп}(2N-1)/2N$ поступово за $U_{оп}/2N$ (крок квантування). Інші входи компараторів об'єднані і на них подається вхідна напруга $U_{вх}$. Коли вхідна напруга досягає значення опорної на будь-якому з компараторів, він спрацьовує і подає сигнал зі свого виходу на перший вхід пристрою кодувальної логіки. Таким чином, на виходах компараторів утворюється унітарний код, що відповідає вхідному сигналу $U_{вх}$ (на виходах усіх «молодших» компараторів – 1, на виходах інших – 0). Виходи компараторів підключаються до декодувального логічного пристрою, який перетворює унітарний код на бінарний. Компаратори зазвичай забезпечуються стробувальним входом для синхронізації роботи всієї системи.

Як декодувальний пристрій може використовуватися пріоритетний шифратор або програмований ПЗП. У таких АЦП використовуються зазвичай надшвидкодіючі компаратори із «защипанням». Час перетворення визначається тривалістю перехідного процесу в компараторах і декодері. У кращих сучасних зразках час перетворення знижено до 5 – 10 нс. Як логічні пристрої використовуються схеми емітерно-зв'язаної логіки (ЕЗЛ).

Паралельні АЦП мають максимально можливу швидкодію. Основні їх недоліки – складність виготовлення прецизійних резисторів подільника і різке збільшення кількості компараторів при підвищенні розрядності. Наприклад, для 8-розрядного АЦП необхідно 255 компараторів, для 12-розрядного паралельного перетворювача – вже 4095.

Прикладами паралельних АЦП можуть бути ІМС серії К1107ПВ (ПВ1 – 6 розрядів; ПВ2 – 8 розрядів, вихід ТТЛ, час перетворення – 0,1–0,2 мкс; ПВ3 – 6 розрядів, вихід – ЕЗЛ, час перетворення – 20 нс). Функціонування цих та ряду інших мікросхем АЦП із зазначенням типу корпусу, призначення виводів і типових схем підключення наведено в довідковій літературі (наприклад, [23]).

При виборі АЦП для роботи в складі ПЗО необхідно проводити аналіз характеристик АЦП, що випускаються. У табл. 6.2 наведено орієнтовні характеристики деяких типів АЦП.

Докладні параметри, схеми підключення, маркування виводів можна знайти в технічній документації, що випускається виробниками на кожен тип АЦП. Найбільш відомі світові виробники і їх сайти з переліком продукції, що випускається, наведено в табл. 6.3.

Серед безлічі сучасних схем АЦП з системної точки зору можна виділити дві важливі групи. Перша – це АЦП низької або середньої швидкодії, високої точності та перешкодостійкості, серед яких однією з кращих схем є схема з двотактним інтегруванням. Друга група – це АЦП помірної точності і високої швидкодії. Поєднання вимог високої точності і великої швидкодії у системах промислової автоматики зустрічається рідко, і кожного разу розробник системи повинен ретельно перевірити обґрунтованість цих вимог. Крім очевидних характеристик точності АЦП – зміщення нуля, змінення коефіцієнтів передачі та швидкодії – велику роль можуть відігравати вартість і кількість прецизійних елементів (як характеристики складності і нестійкості схеми), а також інтегральна і диференціальна нелінійність характеристик.

6.2.2. Цифро-аналогові перетворювачі

Цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) призначено для перетворення вхідного цифрового сигналу, заданого у вигляді числового (двійкового N-розрядного) коду, на відповідний аналоговий сигнал – напруга або струм.

За принципом роботи розрізняють два основні різновиди ЦАП – послідовні і паралельні. Перевагою послідовних ЦАП є простота схемотехнічної реалізації, недоліком – невисока швидкодія. Паралельні ЦАП забезпечують максимально можливу швидкодію, але це досягається шляхом ускладнення схеми порівняно зі схемою послідовного ЦАП.

Таблиця 6.2

Порівняльні характеристики АЦП різних типів

Тип перетворювача	Максимальна кількість двійкових розрядів	Кількість прецизійних елементів	Нелінійність характеристики, % МЗР		Вартість (відносна)	Швидкодія (кількість перетворювань в секунду), імп/с	Перешкодостійкість
			інтегральна	диференціальна			
Інтегровальні: з пілкоподібною опорною напругою	12	3 – 5	0,01	–	Помірна	$10^2 – 10^4$	Низька
	12	3 – 5	0,01	–	Помірна	10	Висока
	16	1	0,001	–	Низька	50 – 500	Дуже висока
ШІМ	10	2	1 – 100	0,01	Дуже низька	$5 \cdot 10^3$	Низька
З порозрядним зрівноважуванням	12	50	50 – 100	10 – 30	Висока	10^6	Низька
Паралельний	8	256	50	50	Висока	10^8	Низька
Зі статистичним вирівнюванням	12	60	1 – 10	1 – 5	Дуже висока	10^5	Середня
Паралельно-последовний	8 – 12	до 150	50 – 100	до 50	Висока	10^7	Низька
Каскадний	8 – 10	до 100	50 – 100	до 50	Помірна	10^7	Низька
Слідкувальний з ЦАП у зворотному зв'язку	12	50	50	10 – 30	Помірна	1 – 10 кГц	Низька

Основні виробники АЦП і ЦАП

Фірма–виробник	Сайт фірми	Примітка
Acquisition Logic	http://www.acquisitionlogic.com	Системи на одному кристалі з PCI-інтерфейсом, швидкодіючі АЦП
Analog Devices	http://www.analog.com	АЦП для звукотехніки, швидкодіючі АЦП, Сигма-Дельта АЦП, конвертери напруга/частота
Grrus Logic	http://www.cirrus.com	Сигма-Дельта АЦП з вбудованим підсилювачем, АЦП з функцією самокалібрування
Linear Technology	http://www.linear.com	24-бітові 8-, 16-канальні Сигма-Дельта АЦП, АЦП для ПЗС-матриць, АЦП з подвійною інтеграцією, Сигма-Дельта АЦП
Maxim	http://www.maxim-ic.com	Конвертери напруга/частота, АЦП з подвійним інтегруванням, Сигма-Дельта АЦП
Microchip	http://www.microchip.com	Конвертери напруга/частота, швидкодіючі АЦП
National Semiconductor	http://www.national.com http://www.semiconductors.com	АЦП для ПЗС-матриць, АЦП для звукотехніки, швидкодіючі АЦП
Philips	http://www.phHips.com	АЦП для звукотехніки, швидкодіючі АЦП
Texas Instruments	http://www.ti.com	24-бітові АЦП

До основних параметрів ЦАП належать:

- розрядність – кількість розрядів вхідного цифрового сигналу, який може бути перетворений на відповідний вихідний аналоговий сигнал;
- швидкодія – час установлення вихідного сигналу (інтервал часу від подачі вхідного цифрового коду до появи вихідного сигналу);
- тип вихідного сигналу – струм або напруга;
- характеристики живлення;
- тип інтерфейсу.

Розрядність ЦАП визначає точність перетворення. Мікросхеми випускаються з розрядністю від 4 до 24 бітів. Найбільш часто використовуються 8-, 10- і 12-розрядні схеми, що забезпечують крок квантування вихідної величини від 1/256 (0,39 %) до 1/4096 (0,0244 %). Мікросхеми з розрядністю більше 12 вважаються прецизійними.

Швидкодію ЦАП прийнято оцінювати за часом установлення вихідного сигналу, який у мікросхем з паралельним інтерфейсом знаходиться в межах від 0,15 до 35 мкс. Найчастіше використовуються перетворювачі низької або середньої швидкодії.

В основному схеми ЦАП побудовані на підсумовуванні N струмів або напруг (N – кількість розрядів вхідного сигналу), величина кожного з яких пропорційна вазі цифрового розряду. При цьому підсумовуються струми розрядів, які мають значення 1. Схему, що реалізує такий алгоритм для 4-розрядного вхідного цифрового коду $A_0 \dots A_3$, показано на рис. 6.6, а. Якщо в цій схемі взяти вагу молодшого значущого розряду (МЗР), що дорівнює току 1 мА, то вага старшого значущого розряду (СЗР) буде дорівнювати струму 8 мА і максимальний вихідний струм перетворювача буде відповідати току 15 мА при надходженні коду 1111. Наявність на вході ЦАП коду 1001 приведе до показань міліамперметра 9 мА, коду 0111 – 7 мА тощо.

Такі схеми, що забезпечують генерацію і комутацію за заданим кодом точних струмів, будуються з використанням біполярних і польових транзисторів, які працюють як ключі. Зазвичай для збільшення швидкодії і точності ключі роблять двотактними, фіксуючи нульові потенціали на лівих виводах масштабних резисторів. Схема на рис. 6.6, а має багато недоліків, основні з яких – величезний діапазон опорів резисторів і необхідність ретельної їх пригонки один до одного.

Необхідність використання великої кількості номіналів резисторів усувається в схемі ЦАП на основі резисторної матриці $R-2R$ (рис. 6.6, б). У такій схемі обов'язковим є застосування трипозиційних ключів на два напрямки. Робота схеми основана на тому, що будь-яка частина ланцюгової або ступінчастої $R-2R$ схеми завжди має вихідний опір, який дорівнює R .

Розглянемо вузол 1 (див. рис. 6.6, б). Його вихідний опір дорівнює R , оскільки зліва від нього є два резистори, кожен з опором $2R$. Аналогічно вихідний опір вузла 2 – R , оскільки зліва є послідовно з'єднані вихідний

опір вузла 1 і опір резистора R (всього $2R$), а також резистор $2R$, підключений паралельно. Це правило діє в усій резистивній схемі $R-2R$.

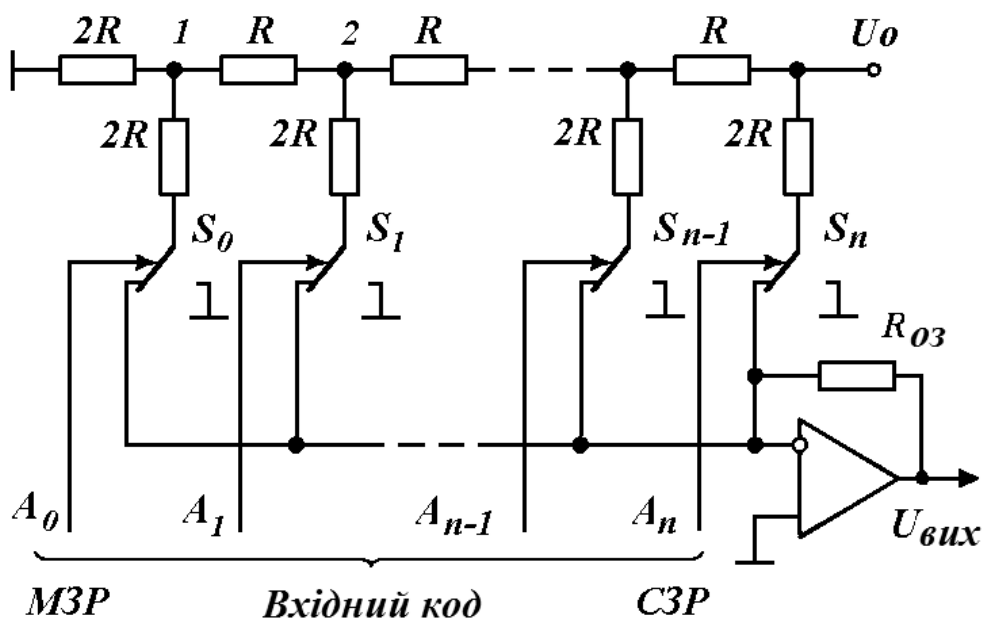
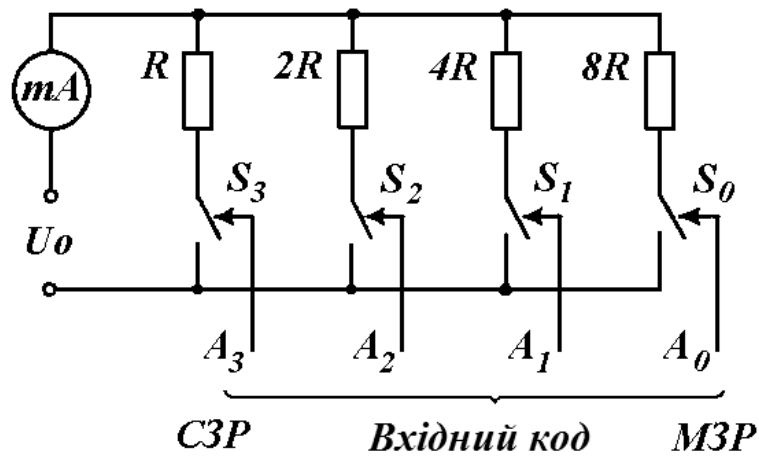


Рис. 6.6. Схеми ЦАП, в яких використовується підсумовування струмів:
а – із застосуванням вагових резисторів; б – з резисторною матрицею $R-2R$

Така особливість схеми $R-2R$ дозволяє створювати у вузлах $1, 2, \dots, N$ опорну напругу, пропорційну вазі розряду. Розподіл потенціалів у вузлах матриці не змінюється при зміні положення ключів, оскільки вхідний опір операційного підсилювача, охопленого негативним зворотним зв'язком через резистор R_{03} , практично дорівнює нулю. Ця обставина при-

водить до послідовного зменшення вдвічі напруги у вузлах схеми в міру їх віддалення від джерела опорної напруги і також зменшення струмів, що проходять через ключі S_0, \dots, S_N . Таким чином, вхідний струм ОП буде пропорційним кількості підключених до входу ОП ключів S , які керуються розрядами перетворювального коду, і на виході ОП напруга $U_{вих}$ буде відповідати поданому на вхід схеми цифровому коду.

Схеми ЦАП на основі резистивних матриць $R-2R$ є практичними, надійними, мають високу швидкість перетворення і легко реалізуються в інтегральному виконанні. На відміну від ЦАП зі зважувальними резисторами тут не потрібно широкого діапазону номіналів і прецизійної точності при їх пригонці. Недоліком такої схеми є поява імпульсних перешкод при перемиканні ключів у процесі змінення коду.

Позбутися таких перешкод можна, використовуючи перетворювач рядкового типу (string DAC), побудований із застосуванням вагових резисторів за схемою рис. 6.7, а. Для керування ключами в схемі передбачається дешифратор з логікою: як тільки будь-який резистор підключається до ланцюга, будь-які подальші збільшення коду вже не можуть його відключити. Для виготовлення багаторозрядного перетворювача рядкового типу потрібна велика кількість резисторів і ключів, тому застосування такої схеми не завжди є раціональним.

Найбільшого поширення набули сегментні схеми, в яких частина вхідного сигналу обробляється рядковим ЦАП, а частина – перетворювачем за схемою $R-2R$. На рис. 6.7, б зображено схему, в якій старші п'ять розрядів 10-розрядного перетворювача декодуються і обробляються 31-розрядним рядковим ЦАП, а молодші п'ять розрядів перетворюються за схемою $R-2R$. Вихідні струми двох цифро-аналогових перетворювачів підсумовуються.

За типами вхідного інтерфейсу мікросхеми ЦАП поділяють на мікросхеми з паралельним і послідовним інтерфейсами.

Мікросхеми з паралельним інтерфейсом, у свою чергу, можуть мати байтовий інтерфейс або інтерфейс більшої розрядності (повнорозрядні). Мікросхеми з послідовним інтерфейсом також поділяють на кілька груп залежно від типу використовуваного інтерфейсу: SPI, PC та ін.

Деякі з основних виробників мікросхем ЦАП наведено в табл. 6.3. На рис. 6.8 показано мікросхеми ЦАП з паралельним і послідовним інтерфейсами, що випускаються фірмою Maxim.

Мікросхема MAX506 є чотириканальним 8-розрядним цифро-аналоговим перетворювачем з байтовим інтерфейсом і чотирма виходами за напругою: VOUTA, VOUTB, VOUTC і VOUTD. Для вибору каналу призначені адресні входи A0 і A1. Мікросхема має один спільний вхід опорної напруги VREF (Voltage Refresh), може працювати як від однополярної напруги живлення +5 В, так і від двополярної – ± 5 В. При живленні мікросхем від

однополярного джерела живлення вивід негативного джерела живлення U_{S1} має бути з'єднаний з виводами аналогового AGND (Analog Ground) та цифрового DGND (Digital Ground) загального проводу, L-активний сигнал запису WR (Write) призначено для запису даних з шини DB [0, 1, ... 7] в буфер мікросхеми.

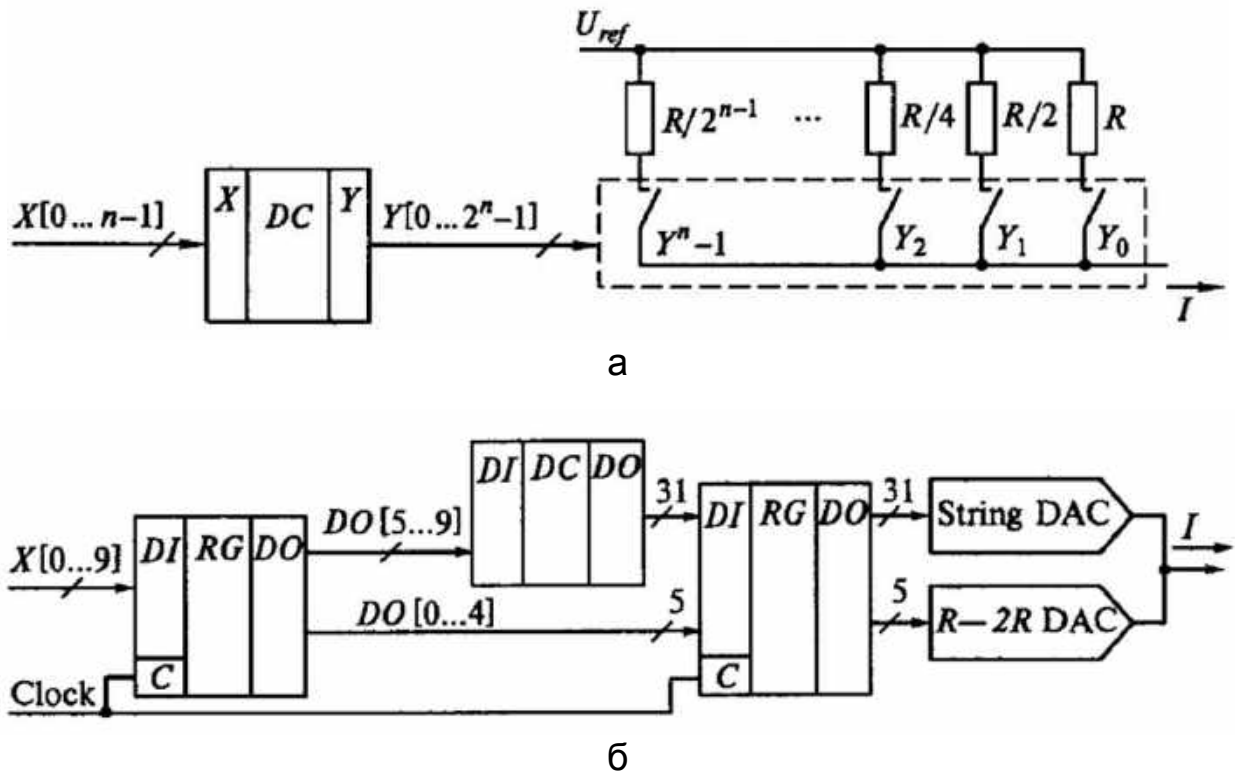


Рис. 6.7. Схеми побудови цифро-аналогових перетворювачів: а – рядкового типу; б – сегментованого типу

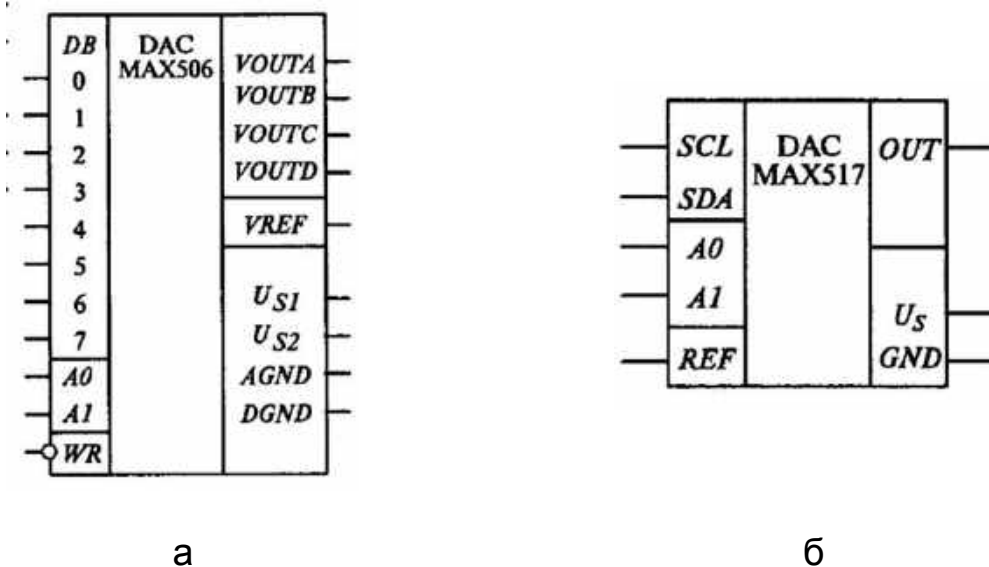


Рис. 6.8. Мікросхеми ЦАП, що випускаються фірмою Maxim: а – з паралельним інтерфейсом; б – з послідовним інтерфейсом

Мікросхема MAX517 – це 8-розрядний цифро-аналоговий перетворювач з інтерфейсом I^2C , використовує для введення даних лінії SDA (Serial Data) і SCL (Serial Clock) і працює від одного джерела живлення з напругою $U_s = 5$ В. Мікросхема забезпечена входом REF (Refresh) для підключення джерела опорної напруги. Послідовний інтерфейс PC забезпечує завантаження даних зі швидкістю до 400 Кбіт/с. Адресні входи A0 та A1 призначені для створення номера веденого пристрою при підключенні декількох ведених до одного ведучого.

7. ПЕРЕДАЧА СИГНАЛІВ ПО ЛІНІЯХ ЗВ'ЯЗКУ І КОДУВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ

Система керування у виробничих умовах розміщується на деякій відстані від технологічного об'єкта (див. рис. 1.2). Величина цієї відстані може вимірюватися метрами і в окремих випадках досягати значень у кілька тисяч метрів. Взаємодія між елементами такої розподіленої мережі, тобто передача інформаційних і керувальних сигналів в ній, здійснюється за допомогою протоколів та інтерфейсів, що забезпечуються апаратними засобами ПЗО.

Протокол – це сукупність процедур для інформаційного обміну між розподіленими елементами системи керування.

Для забезпечення безпомилковості і максимальної зручності передачі інформації комунікаційні операції регулюються набором правил і угод, які називаються мережним протоколом. Мережний протокол визначає типи рознімів, кабелів, сигнали, формати даних і способи перевірки помилок, а також алгоритми для мережних інтерфейсів і вузлів, припускаючи стандартними в межах мережі принципи підготовки повідомлень та їх передачі.

На основі протоколів, що регламентують склад, форму і зміст керувальної інформації, формати, коди, алгоритми обміну і т. п., створюються промислові мережі (FieldBus), що забезпечують інформаційні потоки між датчиками, системами керування та виконавчими механізмами. Нині на ринку існує близько 50 Fieldbus-систем (CAN, LON, PROFIBUS, Interbus, WorldFIP, HART, ControlNet та ін.). Детально ознайомитися з принципами організації та роботи найбільш поширених промислових мереж, технічними характеристиками і їх описом роботи, а також підтримувальними протоколами обміну інформацією можна в роботах [6, 25].

Інтерфейс – це сукупність засобів, необхідних для організації обміну даними, а також правила і фізична реалізація взаємодії між суміжними функціональними компонентами системи керування. Загальний інтерфейс забезпечує інформаційну, електричну і конструктивну сумісність елементів будь-якої системи. Інформаційна сумісність передбачає використання загальних форматів даних, алгоритмів керування, способів кодування, адре-

сації і т. п. Електрична сумісність передбачає узгодженість параметрів використовуваних сигналів, ліній зв'язку, часових характеристик і т. д. Конструктивна сумісність – використання стандартних конструктивних елементів: рознімів, конструктивних модулів та ін.

Зараз застосовуються інтерфейси різного функціонального призначення: від простих інтерфейсів типу «точка-точка» для симплексного обміну даними з пристроями отримання інформації (датчиками) або виконавчими пристроями локальних систем керування до телекомунікаційних технологій промислових мереж.

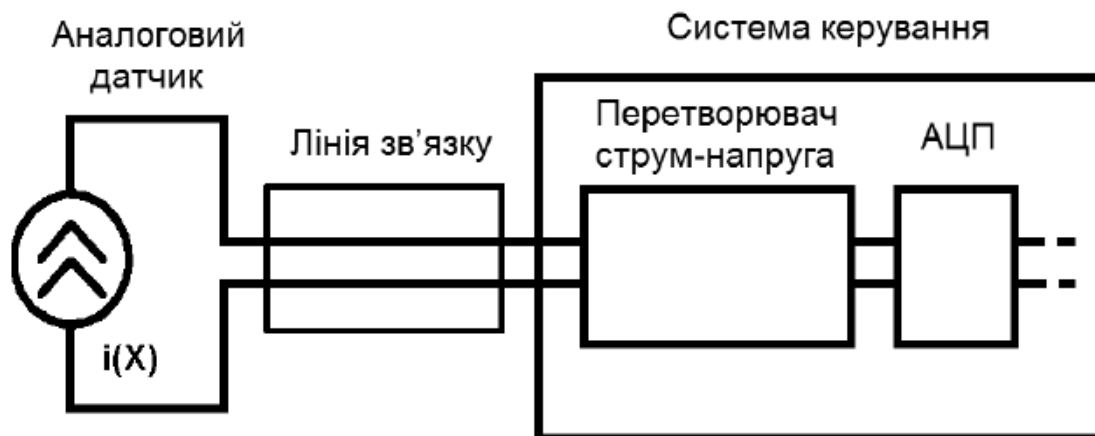
У сучасних інтерфейсах, що застосовуються для зв'язку систем керування з датчиками контролю за параметрами технологічного процесу та виконавчими механізмами, практично завжди використовують послідовний формат даних і загальний канал зв'язку для декількох пристроїв. Інтерфейси з паралельним форматом даних (наприклад, приладові інтерфейси IEEE-488, САМАС) нині застосовуються рідко через велику кількість ліній зв'язку для обміну сигналами.

7.1. Інтерфейс «струмова петля»

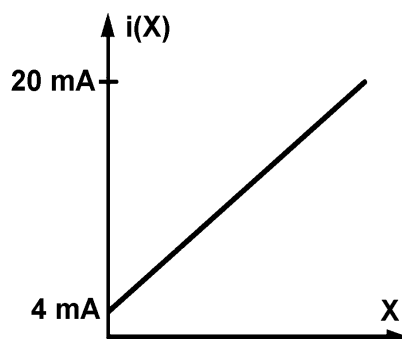
Для передачі аналогових сигналів вимірювальних пристроїв (датчиків тиску, температури тощо) на відстань до декількох десятків метрів застосовують інтерфейс «струмова петля», схему побудови якого зображено на рис. 7.1, а. Основні переваги такого інтерфейсу при передачі стандартних струмових сигналів полягають у простоті його реалізації і меншому впливі перешкод. До того ж при використанні стандарту 4...20 мА ознакою несправності є відсутність сигналу або те, що його значення менше 4 мА при $X = 0$ (рис. 7.1, б).

У приймачах інформації, що розташовуються в системі керування, при використанні такого інтерфейсу струмовий сигнал зазвичай перетворюється на напругу (перетворювачі струм-напруга) для подальшого перетворення на цифровий формат за допомогою АЦП (див. рис. 7.1, а).

Крім аналогового струмового сигналу цей інтерфейс не містить будь-яких інших засобів обміну даними. Незважаючи на обмежені можливості, сфери застосування інтерфейсу залишаються досить широкими, оскільки існує велика кількість датчиків-перетворювачів різних фізичних величин на аналогові електричні сигнали. Для побудови засобів передачі й перетворення аналогових сигналів за інтерфейсом «струмова петля» багато провідних фірм, зокрема фірма Texas Instruments (TI), випускають спеціальні інтегральні мікросхеми. Застосування цих ІМС істотно спрощує вирішення всіх завдань, пов'язаних з перетворенням аналогових сигналів. Ці мікросхеми дозволяють створювати не тільки приймачі струмових сигналів, але й прецизійні перетворювачі сигналів для датчиків різних типів.



а



б

Рис. 7.1. Аналоговий інтерфейс «струмова петля»:
а – фізична реалізація; б – стандартний сигнал 4...20 мА

З параметрами мікросхем для побудови інтерфейсу «струмова петля», що випускаються фірмою Texas Instruments, можна ознайомитися на її сайті [www.ti.com].

7.2. Послідовні інтерфейси для передачі цифрових даних

На зміну стандарту 0...20 мА (4...20 мА та ін.), що застосовується в промисловості більше 30 років, приходить двійковий спосіб подання інформації у системах керування і регулювання. Переваги цього способу: підвищена точність передачі даних, можливість виявлення і усунення помилок при передачі, можливість використання однієї лінії зв'язку для роботи декількох пристроїв, а також використання однієї лінії для передачі як аналогових, так і цифрових сигналів (наприклад, HART-протокол, який буде стисло розглянуто нижче) і т. д.

Послідовні інтерфейси для передачі даних використовують одну сигнальну лінію, по якій інформаційні біти передаються один за одним послідовно. Основні характеристики деяких з найбільш поширених інтерфейсів такого типу наведено в табл. 7.1.

Послідовна передача даних у цифрових каналах може здійснюватися в асинхронному або синхронному режимі.

При асинхронній передачі кожному байту передують старт-біт, що сигналізує приймачу про початок посилання, за яким ідуть біти даних і іноді контрольний біт (парності). Завершує посилання стоп-біт, що забезпечує паузу між повідомленнями.

У синхронному режимі передачі посилання повідомлення починається з синхробіта, за яким відразу ж іде потік інформаційних бітів. Такий режим передбачає постійну активність каналу зв'язку, оскільки якщо у передавача немає даних для передачі, він заповнює паузу безперервним посиланням бітів синхронізації.

Асинхронні протоколи обміну інформацією доцільно використовувати для керування дискретними виробництвами. При цьому необхідно враховувати питання про час відгуку пристроїв у режимі реального часу і виконувати арбітраж запитів від пристроїв за пріоритетністю.

Таблиця 7.1

Характеристики стандартних послідовних інтерфейсів

Характеристика	RS-232C (США)	ИРПС (СРСР)	RS-422	RS-485
Вид передачі	Синхронний/ асинхронний	Асинхрон- ний	Синхронний/ асинхронний	Синхронний/ асинхронний
Середовище передачі	Кручена пара	4-провід- ний зв'язок	Дві інформа- ційні лінії, одна лінія заземлення	Кручена пара/ дві кручені пари
Перешкодочутливість	Властива двопровідна передача		Рівень синфазних перешкод у каналі – до 3 В	
Спосіб кодування	12 В	40 мА і 20 мА	12В	
Максимальна кількість приймачів/ передавачів на лінії	1/1		1/10	32/32
Максимальна довжина лінії (без повторювачів), м	15	500	1300	1200
Максимальна швидкість передачі, кбод	38,4	6,6	90	90...500

Синхронні способи передачі даних є більш прийнятними для циклічних і безперервних виробництв. Оновлення інформації в контролері здійснюється за фіксований проміжок часу для самого віддаленого вузла. Цей режим дозволяє працювати на великих швидкостях, але на обмежених відстанях. Синхронізація забезпечується спеціальним MASTER-вузлом з використанням ще однієї диференціальної пари проводів.

Послідовна передача дозволяє скоротити кількість сигнальних ліній і збільшити дальність зв'язку. У деяких послідовних інтерфейсах застосовується гальванічна розв'язка зовнішніх (зазвичай вхідних) сигналів від схемної землі пристрою, що дозволяє з'єднувати пристрої, які знаходяться під різними потенціалами, і підвищує електробезпеку пристроїв.

7.2.1. інтерфейс RS-232

Одним з перших інтерфейсів, розроблених для зв'язку пристроїв за послідовним цифровим каналом зв'язку, був стандарт RS-232 (стандарт EIA, EIA – Асоціація електронної промисловості), який до теперішнього часу підтримується багатьма пристроями. Аббревіатура RS означає рекомендований стандарт, але іноді стандарти просто позначаються як EIA. Стандарт RS-232 був уведений у 1962 р., у 1969 році було подано третю редакцію (RS-232C), а четверту – у 1987 р. (RS-232D, відома також як EIA-232D). Стандарт RS-232 ідентичний стандартам МККТТ (ССІТТ) V.24 / V.28, X.20bis / X.21bis і ISO IS2110.

Інтерфейс призначено для підключення апаратури, що передає або приймає дані. На рис. 7.2, а показано з'єднання пристроїв при реалізації стандарту RS-232, а на рис. 7.2, б – рівні електричних сигналів логічних нуля (лог. 0) і одиниці (лог. 1).

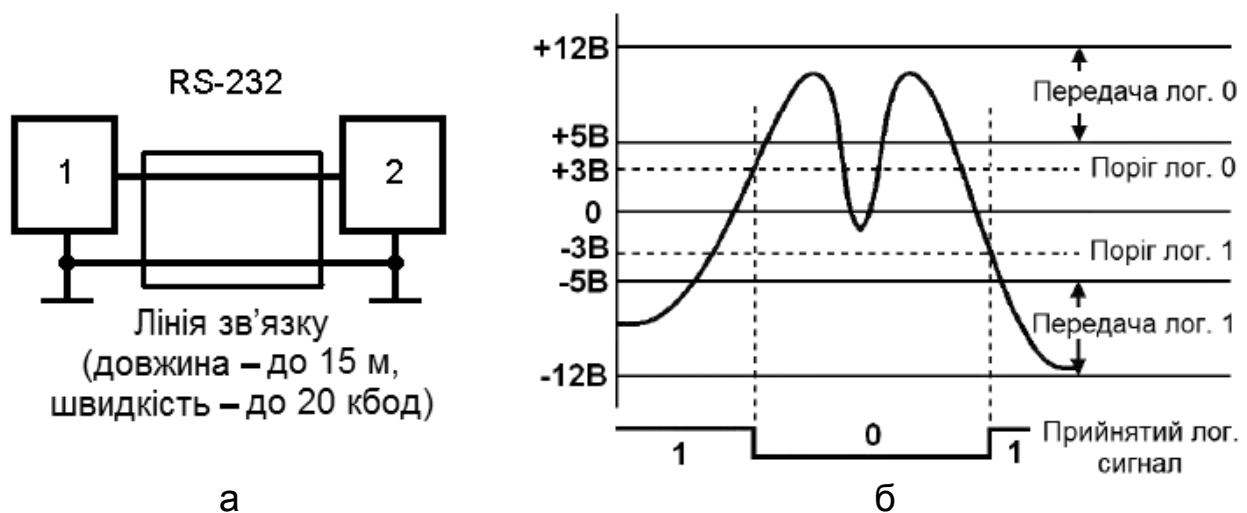


Рис. 7.2. Послідовний інтерфейс RS-232:
а – з'єднання пристроїв 1 і 2 інтерфейсом RS-232;
б – стандартні рівні сигналів

Стандарт RS-232 описує також керувальні сигнали інтерфейсу, передавання даних і типи рознімів. У стандарті передбачено асинхронний і синхронний режими обміну, але слід враховувати, що СОМ-порти комп'ютерів підтримують тільки асинхронний режим.

Інтерфейс RS-232 використовує несиметричні передавачі та приймачі: сигнал передається відносно загального проводу – схемної землі. Крім того, інтерфейс не забезпечує гальванічної розв'язки пристроїв. Різниця потенціалів між схемними землями (SG) з'єднувальних пристроїв має бути менше 2 В, при більш високій різниці потенціалів можливим є неправильне сприйняття сигналів. Звідси випливає, що з'єднувальні пристрої, якщо вони обидва живляться від мережі змінного струму і мають мережні фільтри, потребують захисного заземлення.

Підключення та відключення телекомунікаційних пристроїв з автономним живленням має проводитися при вимкненому живленні, інакше різниця невірних потенціалів пристроїв у момент комутації може виявитися прикладеною до вихідних або вхідних (що небезпечніше) ланцюгів інтерфейсу і вивести з ладу мікросхеми.

В інтерфейсі RS-232 передбачено застосування двох типів рознімів: DE9 і DB25. Наявність букви після цифри в маркуванні розніму означає: P – штирьовий (*male* – "батько"), S – гніздовий (*female* – "мати"). Контакти розніму DB-25S визначено стандартом EIA/TIA-232-E, рознім DE-9S описано в стандарті EIA/TIA-574. Дев'ятиштирьові розніми не мають контактів для додаткових сигналів, необхідних для синхронного режиму.

З'єднання за стандартом RS-232 приймача і передавача інформації з використанням рознімів DB25 показано на рис. 7.3, а. На рис. 7.3, б і в показано зовнішній вигляд рознімів. Призначення контактів рознімів наведено в табл. 7.2.

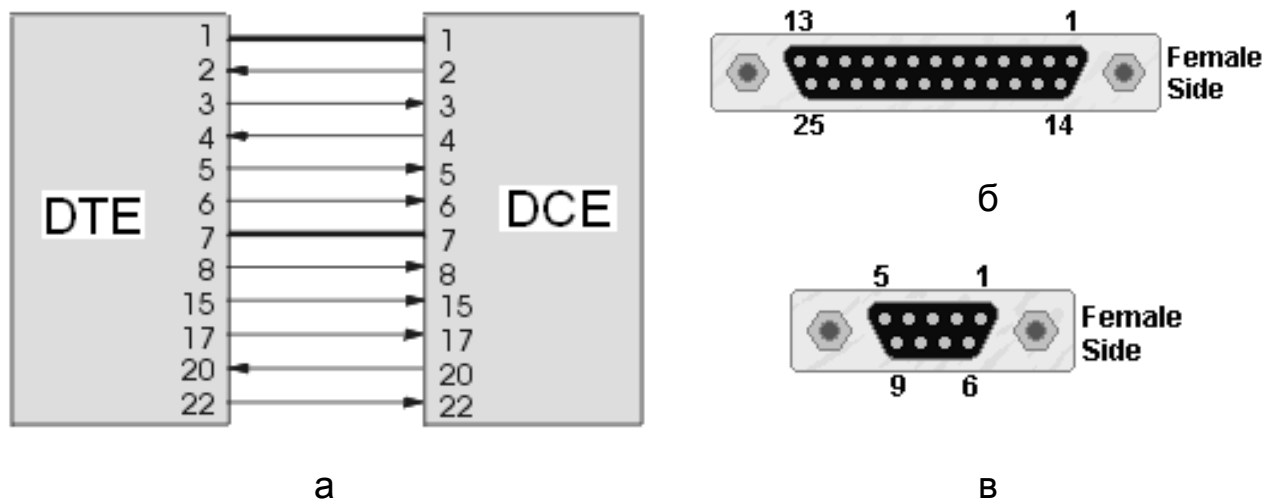


Рис. 7.3. Стандартні розніми інтерфейсу RS-232:
 а – з'єднання передавача DTE і приймача DCE інформації;
 б – рознім DB25 (*female side*); в – рознім DE9 (*female side*)

Таблиця 7.2

Призначення контактів стандартних рознімів інтерфейсу RS-232

Номер контакту розніму DB9	Номер контакту розніму DB25	Позначення	Призначення
1	8	<i>DCD</i>	<i>Data Carrier Detected</i> – детектор сигналу з лінії – при використанні вхідних сигналів виявлення несучої віддаленого модему
2	3	<i>RD</i>	<i>Receive Data</i> – прийом даних – вхід приймача
3	2	<i>TD</i>	<i>Transmit Data</i> – передача даних – вихід передавача
4	20	<i>DTR</i>	<i>Data Set Ready</i> – готовність терміналу – вихід сигналу готовності терміналу до обміну даними. Стан «увімкнено» підтримує комутувальний канал у стані з'єднання
5	7	<i>SG</i>	<i>Signal Ground</i> – сигнальне заземлення – схемна земля, відносно якої діють рівні сигналів
6	6	<i>DSR</i>	<i>Data Set Ready</i> – готовність даних – при використанні вхідних сигналів готовності від апаратури передачі даних
7	4	<i>RTS</i>	<i>Request To Send</i> – запит передачі – вихід запиту передачі даних: стан «увімкнено» повідомляє модем про наявність у терміналі даних для передачі. У напівдуплексному режимі використовується для керування напрямком – стан «увімкнено» є сигналом модему на перемикання у режим передачі
8	5	<i>CTS</i>	<i>Clear To Send</i> – готовність до передачі – вхід дозволу терміналу передавати дані. Стан "вимкнено" апаратно забороняє передачу даних. Сигнал використовується для апаратного керування потоками даних
9	22	<i>RI</i>	<i>Ring Indicator</i> – індикатор виклику (дзвінок)
	1	<i>PG</i>	<i>Protected Ground</i> – захисна земля; з'єднується з корпусом пристрою і екраном кабелю

У стандартних випадках інтерфейс RS-232 використовується для з'єднання двох пристроїв, один з яких є передавачем, а інший – приймачем. Тому сигнали лінії зв'язку RS-232 між приймачем і передавачем формуються і обробляються по-різному. Пристрій-передавач (наприклад, інтелектуальний датчик) у системі передачі даних прийнято називати кінцевим обладнанням даних або DTE (Data Terminal Equipment), а приймач (наприклад, модем системи керування) – пристроєм апаратури передачі даних або DCE (Data Communication Equipment). Напрямок передачі сигналів між DTE і DCE показано на рис. 7.3, а.

В інтерфейсі зазвичай використовується асинхронний режим з форматом окремого повідомлення (UART-кадру): стартовий біт – 5–8 бітів даних – стоповий біт (рис. 7.4). Стартовий і стоповий біти показують початок і кінець повідомлення і дозволяють забезпечити синхронізацію приймачів і контроль довжини повідомлення; стартовий біт – сигнал логічного нуля протягом одного такту, а стоповий біт – сигнал логічної одиниці.

Часто сигнали інтерфейсу формуються зі стандартними логічними рівнями (0; 5 В – інтерфейс UART – *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*), а за протоколом RS-232 рівні напруг становлять ± 12 В. Приймач для перетворення фізичних рівнів сигналів інтерфейсу UART, які називаються драйверами COM-порту, випускаються багатьма виробниками інтегральних мікросхем. Відрізняються мікросхеми кількістю приймачів і передавачів, напругою живлення, споживаною потужністю, максимальною швидкістю передачі, а також наявністю вбудованих конденсаторів і деякими іншими параметрами.

Відсутність передачі



Рис. 7.4. Формат повідомлення в стандарті RS-232

Завдяки нескладним алгоритмам керування, універсальності і можливості дуплексного обміну даними інтерфейс RS-232 широко застосовується як стандартний послідовний інтерфейс зв'язку між різними технічними засобами автоматизації. Наприклад, мікроконтролери сімейств AVR,

PIC і багато інших містять вбудовані засоби апаратної реалізації інтерфейсу UART, через які можуть бути підключені зовнішні пристрої, що забезпечують підтримку інших сучасних інтерфейсів LVDS, 1-W, IrDA, RS-485, CAN і т. п.

Визнаними лідерами в області виробництва мікросхем, необхідних для реалізації стандартних технологій передачі даних по інтерфейсах RS-232 і UART, є фірми *Maxim* [www.maxim-ic.com], *EXAR* [www.exar.com] і *Analog Devices*. Перелік мікросхем, наприклад RS-232 Line Driver/Receivers, що випускає фірма *Maxim*, складається зі 150 найменувань.

Вимоги до підвищення ефективності інформаційного обміну між датчиками і системами керування привели до розроблення інтерфейсів, що забезпечують збільшення довжини лінії зв'язку і кількості пристроїв, які обмінюються інформацією. Інтерфейс *RS-422* забезпечив, завдяки застосуванню струмових петель і низьковольтних диференціальних протоколів, повнодуплексний режим (поперемінна передача даних в обох напрямках) при довжині лінії зв'язку до 1300 м. При цьому зв'язок приймачів (10 адрес) здійснюється одним передавачем.

7.2.2. Інтерфейс RS-485

Наступним кроком стало створення серійного протоколу RS-485, який нині є стандартом інтерфейсу фізичного рівня і розроблений відповідно до вимог сучасних технологій передачі даних. Інтерфейс RS-485 підтримує багатоточкові з'єднання, використовує симетричну лінію зв'язку і диференціальні сигнали, забезпечуючи створення мереж з кількістю вузлів до 32 (для стандартного вхідного опору 12 кОм) і передачу їх на відстань до 1200 м. Використання повторювачів RS-485 дозволяє збільшити відстань передачі ще на 1200 м або додати ще 32 вузли. Інтерфейс RS-485 підтримує напівдуплексний зв'язок при топології «загальна шина».

З'єднання пристроїв за стандартом RS-485 і формат повідомлення показано на рис. 7.5.

Змінення вхідних і вихідних напруг на лініях А і В: від -7 до +12 В (+7 В). В обидва найбільш віддалені кінці кабелю підключають узгоджувальні резистори R_t (термінатори, див. рис. 7.5) по 120 Ом (0,25 Вт). Відповідність швидкості обміну довжині лінії така:

- 62,5 кбіт/с – 1200 м (одна вита пара);
- 375 кбіт/с – 300 м (одна вита пара);
- 2400 кбіт/с – 100 м (дві виті пари);
- 10000 кбіт/с – 10 м.

Різні розширення стандарту RS-485 охоплюють широке розмаїття додатків. Цей стандарт став основою для створення цілого сімейства промислових мереж, які широко використовуються у промисловій автоматичі.

Нині розширюється застосування терміна «інтелектуальний датчик», який означає, що датчик має вбудований мікропроцесор, що дозволяє здійснювати певні функції. Інтелектуальний датчик може давати більш точні показання завдяки застосуванню числових обчислень для компенсації нелінійностей чутливого елемента або температурної залежності. Наприклад, основна похибка інтелектуального датчика серії 3051 Coplanur (фірма Fisher-Rosemount Inc.) становить 0,075 %. За допомогою багатопараметричних датчиків можна виміряти декілька параметрів і перерахувати їх в один вимір (наприклад, об'ємна витрата, температура, тиск, масова витрата), виконання функцій вбудованої діагностики, автоматичного калібрування і таке інше.

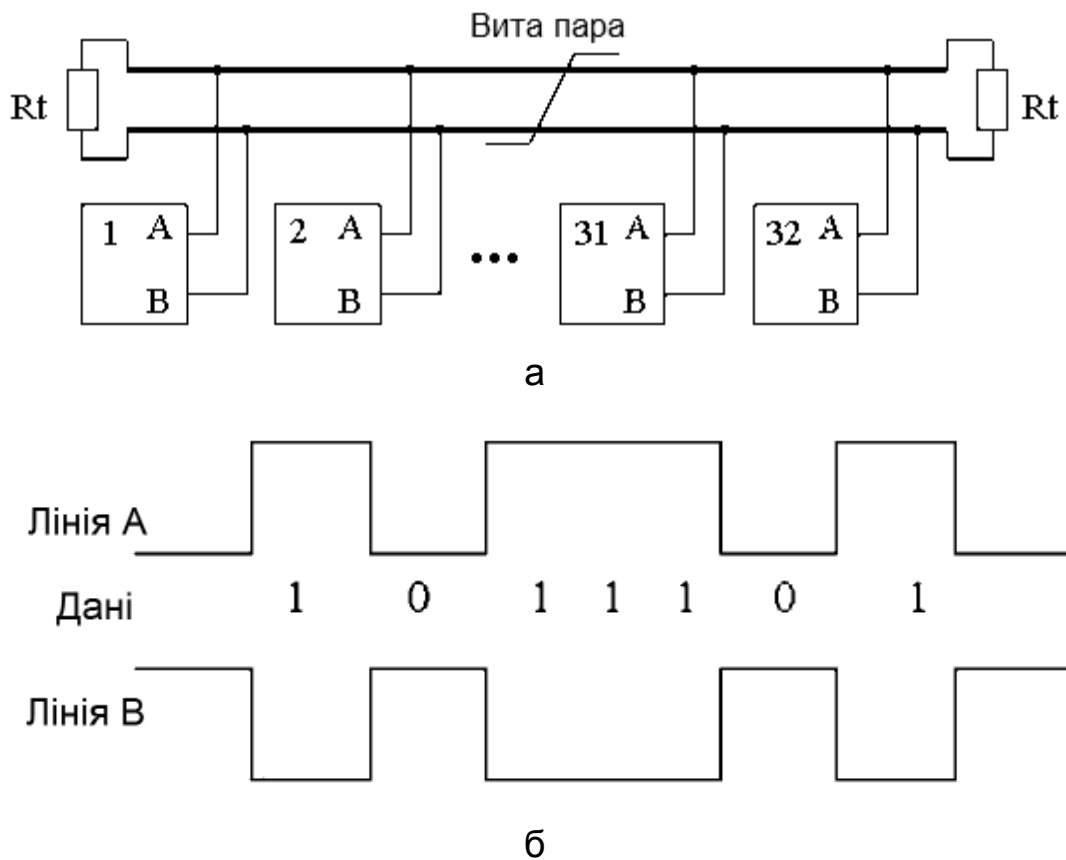


Рис. 7.5. Інтерфейс RS-485: а – з'єднання пристроїв; б – формат сигналу

Багатоінтелектуальні датчики (зокрема, сімейство приладів Rosemount SMART FAMILY) дозволяють посилати в канал передачі і аналоговий, і цифровий сигнали за протоколом *HART*. У разі одночасної трансляції обох видів сигналів аналоговий використовується для трансляції значення виміряного параметра, а цифровий – для функцій налаштування і калібрування з одночасним зчитуванням вимірюваного параметра. Ці пристрої забезпечують переваги цифрового зв'язку і в той же час зберігають сумісність і надійність аналогових засобів, які потрібні для існуючих систем.

Протокол HART на додаток до токового аналогового сигналу дозволяє передавати потік цифрових даних для виконання функцій керування. Протокол HART реалізовано в пристроях децентралізованої периферії ET200iS SIMATIC (Siemens). До аналогового сигналу струмової петлі 4...20 мА для передачі цифрових даних додаються двочастотні струмові сигнали («1» – 1200 Гц, «0» – 2200 Гц, амплітуда змінного струму – 0,5 мА) з нульовою постійною складовою. За допомогою фільтрів сигнали можна розділити, забезпечуючи їх повну незалежність один від одного. В інтелектуальних периферійних модулях крім передачі аналогового сигналу протокол HART дозволяє забезпечити виконання стандартних додаткових функцій: керування параметрами і режимами, діагностику, відображення інформації про параметри і режими і т. п.

Цифровий (інтелектуальний) датчик дозволяє зберігати додаткову інформацію про процес (тег, описувач позиції вимірювання, діапазон калібрування, одиниці виміру, запис про процедури його обслуговування, прочитування за запитом та ін.). Багатопараметричні прилади містять базу даних про фізичні властивості вимірюваних рідин і газів.

7.3. Гальванічна розв'язка засобів ПЗО

Під гальванічною розв'язкою (ізоляцією) розуміють передачу енергії або сигналу між електричними ланцюгами без електричного контакту між ними. Її застосування в системах збирання і оброблення даних, контролю та керування (особливо при функціонуванні у виробничих умовах) є необхідним для вирішення таких основних завдань:

- захист вхідних ланцюгів інтерфейсних пристроїв при вмиканні від імпульсів струму, що виникають через різницю потенціалів з'єднувальних сигнальних ланцюгів;

- забезпечення необхідної перешкодозахищеності від індустриальних та інших перешкод;

- захист людини й електронних приладів від небезпечних впливів зовнішніх джерел напруг і струмів.

Найбільш важливими параметрами пристроїв гальванічної ізоляції є:

- електрична міцність ізоляції;

- максимальна швидкість збільшення синфазного сигналу;

- кількість каналів передачі сигналів;

- швидкість передачі сигналу;

- споживана потужність.

Гальванічна ізоляція між елементами досягається завдяки використанню не електричного, а електромагнітного (трансформаторного, оптичного або ємнісного) зв'язку для передачі сигналів. Найбільшого поширення набули схеми, що використовують трансформаторну і оптичну розв'язки, показані на рис. 7.6.

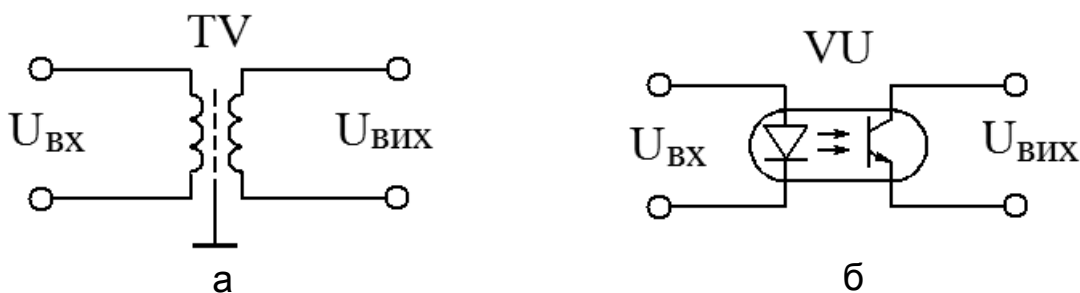


Рис. 7.6. Види гальванічної розв'язки:
а – трансформаторна; б – оптоелектронна

Гальванічна розв'язка трансформаторного типу передбачає використання магнітоіндукційного елемента (трансформатора) з осердям або без нього, змінна напруга $U_{ВІХ}$ на вторинній обмотці якого пропорційна змінній напрузі $U_{ВХ}$ на первинній обмотці (див. рис. 7.6, а). Особливістю такої розв'язки є передача тільки змінення сигналу $U_{ВХ}$, постійна складова через трансформатор TV не проходить.

Трансформаторна гальванічна розв'язка відрізняється простотою реалізації, легкістю організації багатоканальної передачі сигналів і низькою споживаною потужністю при одночасному забезпеченні високої міцності ізоляції між сигнальними лініями. Разом з тим їй властиві такі недоліки:

- наявний сигнал може створювати перешкоди, які впливають на вихідний сигнал розв'язки;
- смуга пропускання сигналу обмежена через низьку частоту модуляції розв'язки;
- порівняно великі габаритні розміри трансформатора, що реалізує розв'язку.

Нині у зв'язку з розвитком технології напівпровідникових пристроїв розширюються можливості використання оптоелектронних розв'язувальних пристроїв, які називаються також оптичними вентилями, оптопарами або оптронами (від англ. «optical electronic device»).

Принцип роботи оптрона (див. рис. 7.6, б) полягає у такому. Діод LED, рn-перехід якого зміщено у прямому напрямку, при надходженні сигналу випромінює електромагнітні коливання певної частоти (світло). Це випромінювання сприймається приймальним елементом – фототранзистором, що формує вихідний сигнал. Таким чином здійснюється гальванічна розв'язка електричних ланцюгів: первинного, пов'язаного зі світлодіодом, і вторинного, який керується фототранзистором.

Як сприймальний елемент в оптронах можуть застосовуватися фотодіоди (рис. 7.7, а), фототиристри (рис. 7.7, б) і фоторезистори (рис. 7.7, в).

Основною перевагою оптоелектронних розв'язувальних пристроїв є використання електрично нейтрального випромінювання (фотонів) для передачі інформації. Це забезпечує їм таке:

- здатність здійснювати розв'язку в широкому діапазоні напруг, у то-

му числі до величини 500 В (і вище), що дозволяє створювати високозахищені системи введення даних;

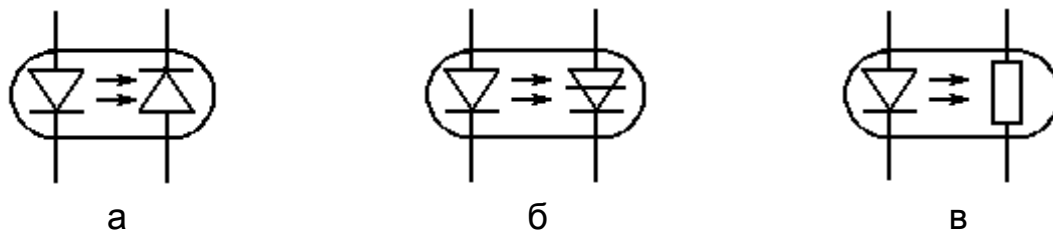


Рис. 7.7. Різновиди оптоелектронних пристроїв:
а – фотодіодні; б – фототиристорні; в – фоторезисторні

– широкі можливості щодо частоти передавального сигналу: від низьких частот (аж до постійної складової) до високих (у кілька десятків мегагерц);

– можливість безконтактного оптичного керування електронними об'єктами і обумовлені цим різноманітність і гнучкість конструкторських рішень керувальних ланцюгів;

– односпрямованість поширення інформації по оптичному каналу і відсутність зворотної реакції приймача на випромінювач (вхідний сигнал);

– сумісність з напівпровідниковими і мікроелектронними приладами;

– малі габаритні розміри.

До недоліків оптронів належать:

– досить велика споживана потужність, обумовлена необхідністю подвійного перетворення енергії (електрика – світло – електрика);

– підвищена чутливість до впливу високих температури і радіації;

– відносно високий рівень власних шумів, обумовлений, як і два попередніх недоліки, особливостями фізичних процесів у світлодіодах;

– конструктивно-технологічна недосконалість, пов'язана з необхідністю об'єднання в одному приладі декількох окремих кристалів з різних напівпровідників, що розташовані в різних площинах;

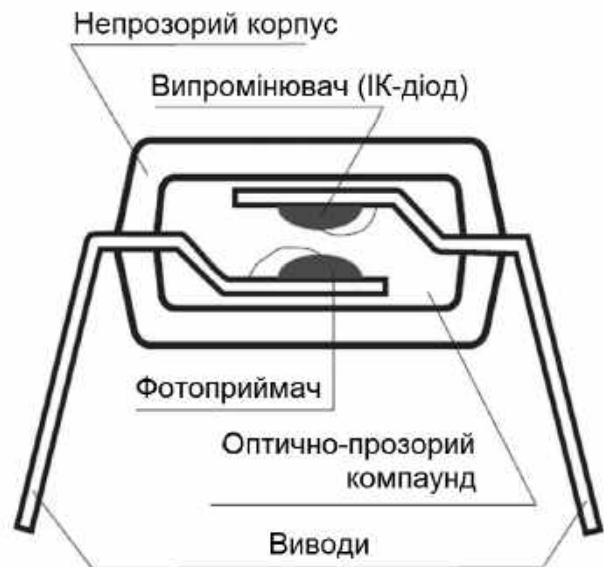
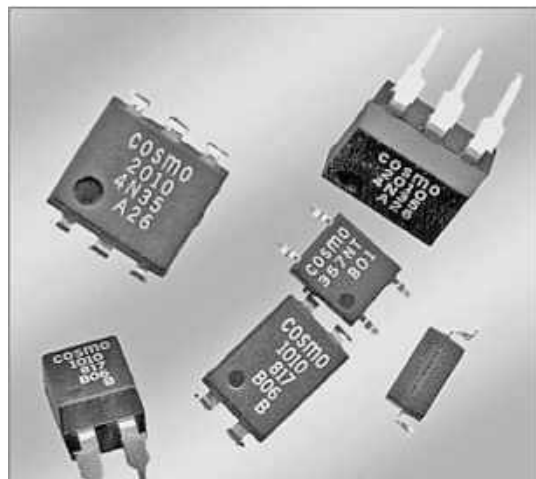
– погіршення параметрів з часом.

Елементи гальванічної ізоляції конструктивно виконуються у вигляді зборок, що містять кілька інтегральних і дискретних компонентів в герметичних корпусах. Зазвичай їх зовнішні габарити відповідають корпусам інтегральних схем DIP4 або SOIC8/16 зі збільшеними розмірами. Деякі компоненти мають вбудовані ізольовані джерела живлення.

Різні електронні компоненти з оптоелектронною ізоляцією виготовляють багато компаній, серед яких Agilent Technologies [www.semiconductor.agilent.com], Texas Instruments COSMO Electronics [www.cosmo-ic.com] та ін.

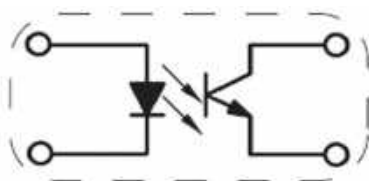
Як приклад на рис. 7.8 показано зовнішній вигляд, пристрій і схеми оптопар фірми COSMO Electronics, в табл. 7.3 подано їх основні парамет-

ри. При виборі оптопари необхідно керуватися наведеними в документації маркуванням виводів, значенням максимального вхідного струму (напруги), характеристиками вихідного сигналу, електричною міцністю ізоляції. При цьому потрібно враховувати, що виробники зазвичай вказують випробувальне значення електричної міцності ізоляції, а робоче значення цього параметра набагато менше.

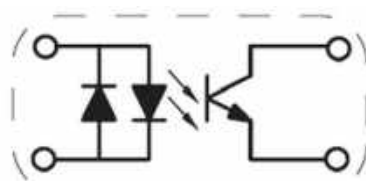


а

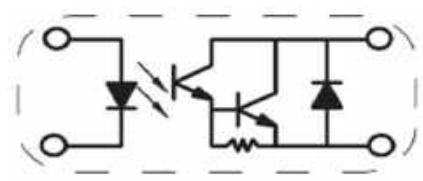
б



в



г



д

Рис. 7.8. Оптрони фірми COSMO: а – зовнішній вигляд; б – конструкція; в, г, д – електричні схеми оптопар [40]

7.4. Кодування цифрової інформації для передачі по послідовному каналу зв'язку

При розробленні систем керування технологічними об'єктами доводиться постійно мати справу з перетворенням цифрових кодів з одного формату подання даних на інший. Це пов'язано з різними причинами, серед яких можна виділити такі:

- забезпечення перешкодостійкості при проходженні інформаційних даних по каналах зв'язку;
- перетворення інформації з паралельного коду на послідовний для передачі по лінії зв'язку і, навпаки, для оброблення інформації в системі керування;

Таблиця 7.3

Основні параметри оптопар COSMO Electronics

Найменування	Тип корпусу	Особливості застосування	Прямий струм, мА	Зворотна напруга колектор – емітер, В	Коефіцієнт передачі за струмом, мінімальний	Електрична міцність ізоляції, В
Одноканальні транзисторні оптопари						
K1010	8-pin DIP, SM D, H	Компактний корпус, висока електрична міцність ізоляції	50	60	60	5000
K3010	4-pin DIP, SM D, H	АС вхід, компактний корпус, висока електрична міцність ізоляції	± 50	60	60	5000
Одноканальні транзисторні оптопари в корпусі Mini-flat						
KPC354 NT	4-pin Mini-flat	АС вхід, мініатюрний корпус, висока електрична міцність ізоляції	± 50	60	20	3750
KPC355 NT	4-pin Mini-flat	Високий коефіцієнт передачі, компактний корпус	50	30	600	3750
Одноканальні транзисторні оптопари в корпусі Slim-SOP (SSOP)						
KPS2801	4-pin Slim SOP	Компактний корпус, висока електрична міцність ізоляції	50	80	80	2500
Багатоканальні транзисторні оптопари						
KP1020	8-pin DIP, SM D, H	Компактний корпус, висока електрична міцність ізоляції	50	60	60	5000
KP4040	16-pin DIP, SM D, H	Високий коефіцієнт передачі, компактний корпус, висока електрична міцність ізоляції	50	300	600	5000
Оптоізовані симістори						
KMOC 3022	8-pin DIP, SM D, H	Електродвигуни змінного струму, електромагнітні замки	50	400	10	5000

– перетворення інформації з одного коду на інший для її візуалізації, наприклад двійкового коду на код семисегментного або рідкокристалічного індикатора;

– зведення вихідного коду датчика або іншого первинного пристрою (коду Грея і т. п.) до нормального двійкового коду.

Методи перетворення цифрових кодів, принципи роботи і проектування пристроїв, що реалізують ці методи, досить докладно описано в навчальній і технічній літературі [17, 19 – 22, 26].

Розглянемо методи кодування, що застосовуються при передачі цифрової інформації по послідовних каналах зв'язку. Такий канал зазвичай являє собою виту пару проводів або коаксіальний кабель необхідної довжини, що з'єднує джерело інформації (датчик) і приймач інформації (систему керування технологічним об'єктом). Схему типового послідовного каналу зв'язку показано на рис. 7.9.

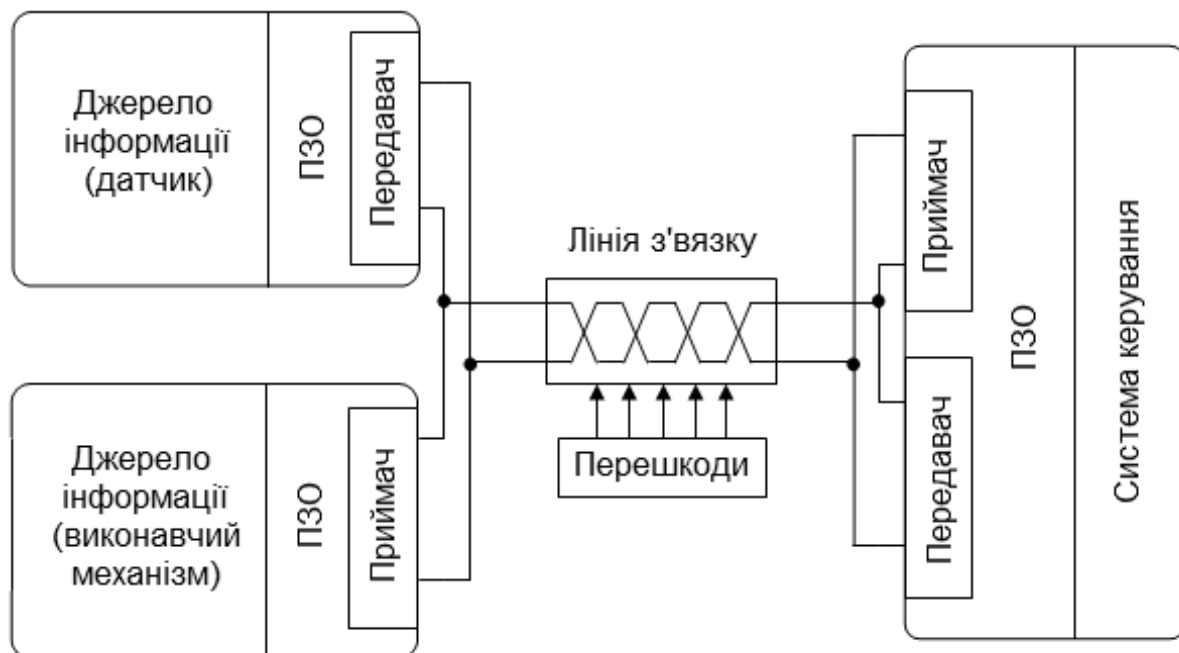


Рис. 7.9. Схема типового послідовного каналу зв'язку

На виході джерела інформації та вході приймача інформації розташовуються засоби ПЗО, що виконують функції передавача і приймача, а також кодерів і декодерів сигналів. За режимами передачі і прийому даних зв'язок між передавачем і приймачем буває:

– симплексним – односторонній однонаправлений зв'язок від передавача до приймача;

– напівдуплексним – двосторонній зв'язок по одному каналу зв'язку, коли прийом і передача інформації відбуваються по черзі;

– дуплексним – двосторонній зв'язок, прийом і передача інформації відбуваються одночасно.

Алгоритми роботи передавача і приймача, показаних на рис. 7.9, визначаються протоколом обміну інформацією, зокрема вибраним кодом, призначеним для передачі по лінії, який називається також лінійним кодом.

Найпростішим лінійним кодом, який передає двійкове кодове посилення (рис. 7.10, а), є уніполярний код типу NRZ (non return to zero), зображений на рис. 7.10, б. У цьому коді нулі означають відсутність імпульсу, а одиниці – наявність імпульсу. Величина напруги «нуля» і «одиниці» регламентується якщо не протоколом обміну, то застосовуваним інтерфейсом. Цей код має чотири недоліки:

- середня потужність, що виділяється на вхідному опорі R приймача, дорівнює $A^2/2R$, де A – амплітуда імпульсу; ця величина у два рази перевищує потужність при «біполярному» кодуванні;

- у зв'язку з наявністю в коді NRZ постійної складової під час передачі довгої послідовності одиниць по лінії зв'язку поєднання з апаратурою ПЗО через реактивні елементи (індуктивності і ємності) утруднено або зовсім є неможливим, оскільки реактивні елементи на досить низьких частотах залежно від типу реактивності являють собою або «обрив», або «коротке замикання»;

- недостатня синхронізуюча здатність коду – при передачі одиниці після досить великої серії з N нулів у приймачі можлива помилка, пов'язана з визначенням місця розташування одиниці (на позиції N , $N + 1$ або $N + 2$) і обумовлена відмінністю частот задавальних генераторів в передавачі і приймачі;

- низька перешкодозахищеність коду через відсутність можливості оперативної реєстрації помилок, спричинених індустріальними перешкодами на лінії зв'язку (зникнення імпульсів або їх виникнення на позиціях «нулів»).

Біполярний сигнал NRZ (рис. 7.10, в) має кращі енергетичні характеристики. Одиниця у цьому коді подана позитивним рівнем напруги, нуль – негативним. Середня потужність на навантаженні дорівнює $A^2/4R$, тобто половині середньої потужності уніполярного сигналу, хоча перепад рівнів однаковий. Решта три недоліки зберігаються. Для їх ліквідації необхідно введення надмірності коду. Це можна здійснити одним з двох методів:

- забезпеченням швидкості передачі сигналів по лінії більшої, ніж швидкість передачі інформації при тих же рівнях електричних сигналів;

- уведенням додаткових рівнів електричних сигналів при однакових швидкостях передачі по лінії сигналів та інформації.

Прикладом коду з надмірністю, введеною за першим методом, є код «Манчестер-II». Форму біполярного сигналу при передачі цього коду показано на рис. 7.10, г. Кодування тут відбувається внаслідок перепаду сигналу в середині бітового інтервалу: одиниця кодується негативним пере-

падом, нуль – позитивним. На межах бітових інтервалів сигнал за необхідності змінює значення для підготовки до кодування наступного біта.

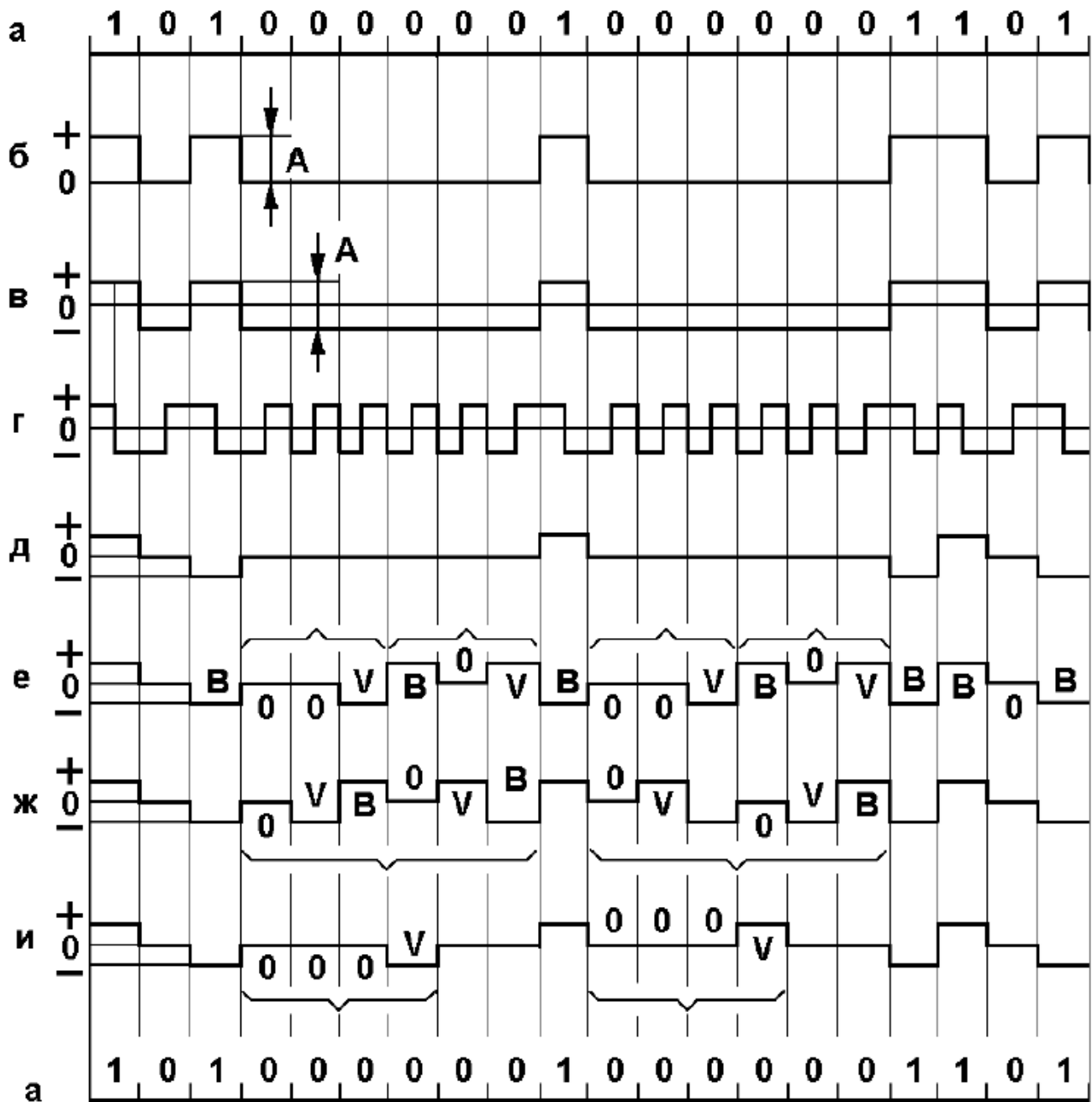


Рис. 7.10. Коды, що застосовуються для передачі інформації по послідовних каналах зв'язку: а – двійкове кодове послання; б – уніполярний код NRZ; в – біполярний код NRZ; г – код «Манчестер-II»; д – код AMI; е – код B3ZS; ж – код B6ZS; и – код HDB3 (дужками позначено заготовки)

У коді «Манчестер-II» вирішується низка зазначених вище проблем: постійна складова відсутня, знімається проблема синхронізації (код є са-

мосинхронізовним), забезпечується хороша перешкодозахищеність. Ці корисні якості призводять до подвоєння пропускну здатності каналу зв'язку, оскільки спектр сигналу містить складову $2F$, де F – швидкість передачі інформаційних бітів. Тому код «Манчестер-II» в основному використовується в системах, в яких частотні обмеження не є визначальними, зокрема в багатьох локальних мережах мікроЕОМ.

Другий метод отримання надмірності пов'язаний з уведенням додаткових електричних рівнів, у найпростішому випадку третього, «нульового» рівня. На рис 7.10, д наведено форму коду АМІ (Alternate Mark Inversion), в якому сигнал має поперемінно інверсію знака. Нулі в такому сигналі кодуються відсутністю імпульсів, а одиниці – поперемінно позитивними і негативними імпульсами. Перевагами коду АМІ є відсутність постійної складової, можливість виявлення помилок, що порушують правильну послідовність знакозмінних сигналів, самосинхронізація коду при передачі послідовності одиниць.

Проблема втрати синхронізації при передачі послідовності нулів вирішується шляхом заміни передавачем ланцюжка нулів певними стандартними «заготовками» з «0» і «1». Коди АМІ, в яких ланцюжок з N нулів замінюється такою підстановкою, називаються BNZS-кодами (bipolar with N zeroes substitution).

У коді B3ZS кожні три послідовно розташованих нулі замінюються комбінацією або B0V, або 00V. Символ B позначає імпульс, який відповідає правилам кодування АМІ, символ V – імпульс, який порушує правила кодування АМІ, тобто збігається за полярністю з попереднім. Вибір однієї з цих двох «заготовок» здійснюється так, щоб, по-перше, кількість імпульсів B між двома послідовно розташованими імпульсами V була непарною і, по-друге, щоб полярність імпульсів V чергувалася (рис. 7.10, е). У коді B6ZS кожні шість послідовних нулів замінюються комбінацією 0VB0VB (рис. 7.10, ж). Аналогічні правила кодування застосовуються в коді HDB3, в якому кожні чотири послідовно розташованих нулі замінюються комбінацією 000V або B00V (рис. 7.10, и).

Електричну схему кодера двійкового коду в код «Манчестер-II», побудовану з використанням мікросхем середнього ступеня інтеграції серії К 1554, показано на рис. 7.11, часові діаграми, що ілюструють роботу кодера, – на рис. 7.12.

Затребуваність в пристроях, що перетворюють двійковий код на код «Манчестер-II», привела до появи спеціалізованих мікросхем, що випускаються різними виробниками. Прикладами цих ІМС є мікросхеми серій 3D7501, K588ВГ6 та ін. Такі ІМС є одночасно і декодерами коду «Манчестер-II» у двійковий код. Технічні характеристики, призначення та нумерацію виводів, опис роботи ІМС кодерів/декодерів манчестерського коду (Manchester Encoder/Decoder) можна знайти у відповідній довідковій літературі та технічному описі самих мікросхем.

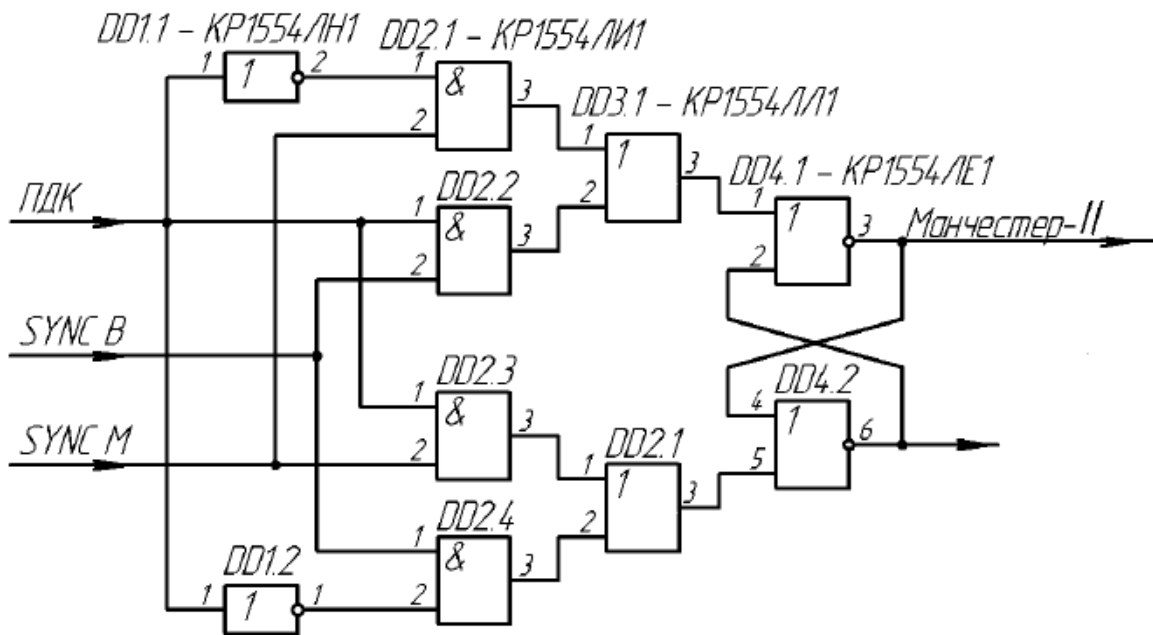


Рис. 7.11. Електрична схема кодера, що перетворює прямий двійковий код (ПДК) на код «Манчестер-II»

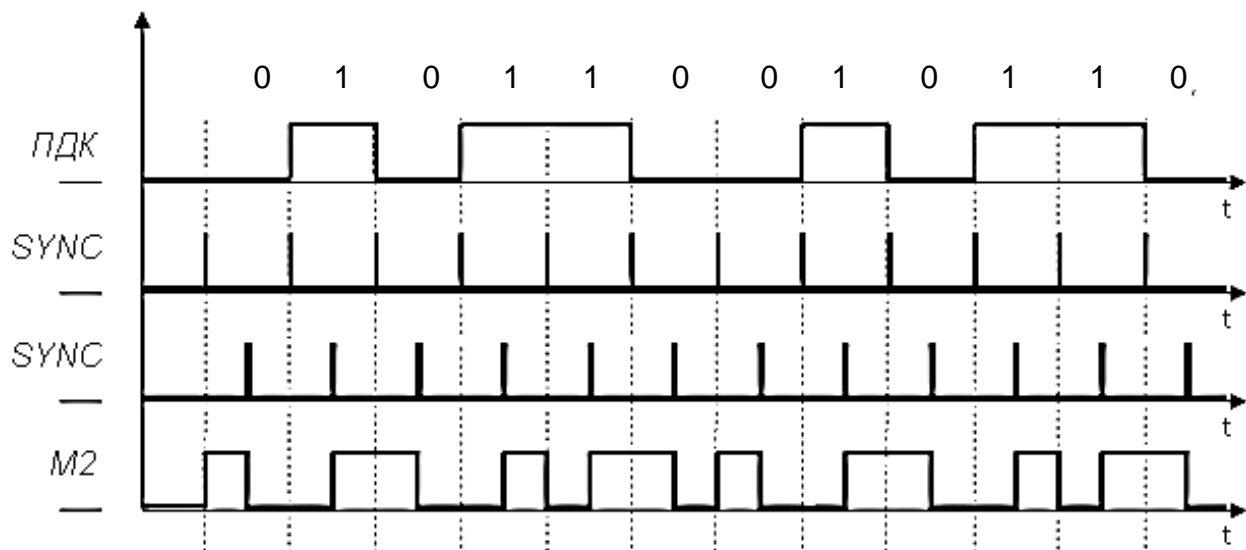


Рис. 7.12. Часові діаграми роботи кодера

7.5. Перешкодостійке кодування

Методи підвищення якості прийому сигналів, що передаються, пов'язані з перешкодостійким кодуванням. Одні методи перешкодостійкого кодування основані на збільшенні перешкодостійкості прийому одиничних сигналів, які полягають у виборі рівня сигналу, відношення сигнал-перешкода і т. д. Інші методи основано на штучному введенні надмірності в передане повідомлення, що дозволяє виявляти і виправляти (коригувати) помилки, які виникають.

7.5.1. Коригувальний код Хеммінга

Найбільш відомим кодом, що дозволяє завдяки введенню надмірності здійснювати самоконтроль і самокорекцію, є код Хеммінга. У цьому коді використовується принцип перевірки на парність певного ряду інформаційних символів (k) за допомогою введених в кодове слово за певним алгоритмом перевірних символів (r).

Код Хеммінга є двійковим блоковим рівномірним коригувальним кодом. При використанні блокових рівномірних кодів цифрова інформація передається у вигляді окремих кодових комбінацій (блоків) рівної довжини. Кодування і декодування кожного блока здійснюють незалежно один від одного.

У коді Хеммінга кодові комбінації складаються з двох частин: інформаційної та перевірної. При загальній кількості символів у блоці, яка дорівнює n , кількість інформаційних символів становить k , а кількість перевірних (надлишкових) символів

$$r = n - k.$$

До основних характеристик коригувальних кодів належать:

- кількість дозволених і заборонених кодових комбінацій;
- мінімальна кодова відстань;
- кількість виявлених або виправлених помилок;
- коригувальні можливості кодів.

У загальному випадку загальна кількість можливих кодових комбінацій блочного двійкового коду з кількістю символів у блоках, яка дорівнює n , визначається так:

$$N_0 = 2^n.$$

Кількість дозволених кодових комбінацій за наявності k інформаційних розрядів

$$N_k = 2^k.$$

Зрозуміло, що кількість заборонених комбінацій

$$N_z = N_0 - N_k = 2^n - 2^k.$$

При перешкодостійкому кодуванні передаються не всі кодові комбінації N_0 , які можна сформувати з наявної кількості розрядів n , а тільки їх частина N_k , яка є складовою підмножиною дозволених комбінацій. Якщо при прийомі з'ясується, що кодова комбінація належить до заборонених, то це свідчить про наявність помилок в комбінації. Далі приймається рішення про помилку і по можливості проводиться корекція прийнятого повідомлення. Тому перешкодостійкі коди називають коректувальними. Коректувальні властивості надлишкових кодів залежать від правила їх побудови, що визначає структуру коду і параметри коду (кількість розрядів, надмірність і т. п.).

Зі збільшенням кількості помилок, які потрібно виявити або виправити, збільшується і кількість перевірних символів, тобто збільшується розрядність коду n . При цьому тривалість передачі кодових слів істотно зростає, що призводить до затримки інформації при її передачі та прийомі.

7.5.2. Коригувальна здатність коду. Мінімальна кодова відстань

Для виявлення та виправлення помилок дозволені комбінації мають якомога більше відрізнятися від заборонених. Мірою відмінності двох кодових комбінацій x_i і x_j є кодова відстань $d(x_i, x_j)$ між ними – кількість розрядів (символів), які відрізняють ці дві кодові комбінації. Визначення цієї відстані полягає у додаванні кодових комбінацій за модулем 2 і підрахунку кількості одиниць в отриманій сумі. Наприклад, дві кодові комбінації $x_i = 01011$ і $x_j = 10010$ мають кодову відстань $d(x_i, x_j)$, яка дорівнює трьом:

$$x_i \oplus x_j = 11001 \rightarrow d(x_i, x_j) = 3,$$

де " \oplus " – операція додавання за модулем 2 (mod2).

Кодову відстань $d(x_i, x_0)$ між комбінацією x_i і нульовою комбінацією $x_0 = 00 \dots 0$ називають вагою W комбінації x_i , тобто вага x_i дорівнює кількості одиниць в ній:

$$\begin{aligned} x_i = 01011 &\rightarrow W = 3; \\ x_j = 10010 &\rightarrow W = 2. \end{aligned}$$

Хеммінг увів поняття мінімальної кодової відстані d_{min} , що визначається при порівнянні з парами всіх кодових комбінацій у цьому коді. Мінімальна кодова відстань (відстань Хеммінга) є найважливішою характеристикою перешкодостійких кодів, що вказує на гарантовану кількість виявлених помилок або таких, які виправляються заданим кодом.

У загальному випадку під кратністю помилки розуміють кількість позицій кодової комбінації, в яких передані символи виявилися замінені на інші. Можливими є дворазові ($g = 2$) і багаторазові ($g > 2$) спотворення елементів у кодовій комбінації в межах $0 \leq g \leq n$.

Якщо код використовується тільки для виявлення помилок кратністю g_0 , то необхідно і достатньо, щоб мінімальна кодова відстань

$$d_{min} \geq g_0 + 1.$$

У цьому випадку ніяка комбінація з g_0 помилок не може перевести одну дозволена кодову комбінацію в іншу. Таким чином, умова виявлення всіх помилок кратністю g_0 можна записати у вигляді

$$g_0 \leq d_{min} - 1.$$

Щоб можна було виправити всі помилки кратністю g_u і менше, необхідно мати мінімальну відстань, що задовольняє умову

$$d_{min} \geq 2g_u + 1.$$

У цьому випадку будь-яка кодова комбінація з кількістю помилок g_u відрізняється від кожної дозволеної комбінації не менше ніж в $g_u + 1$ позиціях. Якщо ця умова не виконана, то можливий випадок, коли помилки кратністю g спотворять передану комбінацію так, що вона стане ближче до однієї з дозволених комбінацій, ніж до переданої, або перейде в іншу дозволена комбінацію. Відповідно до цього умова виправлення всіх помилок кратністю не більше g_u можна записати у вигляді

$$g_u \leq (d_{min} - 1)/2.$$

Звідси випливає, що якщо код виправляє всі помилки кратністю g_u , то кількість помилок, які він може виявити, буде $g_o = 2g_u$.

7.5.3. Побудова коду Хеммінга

Розглянемо як приклад побудову коду Хеммінга для передачі чотирьох інформаційних символів (i_1, i_2, i_3, i_4), який виявляє дворазову помилку і виправляє одноразову. На підставі викладеного вище очевидно, що такий код повинен мати три перевірних символи (r_1, r_2, r_3), тобто його параметри $n = 7, k = 4, r = 3$ (код Хеммінга з маркуванням (7, 4)).

Побудова кодів Хеммінга базується на принципі перевірки на парність ваги W (кількість одиничних символів) в інформаційній групі кодового блока. Нехай для простоти інформаційні символи розташовуються на початку кодового слова. Доповнення інформаційних символів трьома перевірними у цьому випадку здійснюється за правилом

$$\begin{aligned} r_1 &= i_1 \oplus i_2 \oplus i_3; \\ r_2 &= i_2 \oplus i_3 \oplus i_4; \\ r_3 &= i_1 \oplus i_2 \oplus i_4. \end{aligned}$$

У табл. 7. 4 вписано всі 16 кодових слів для коду Хеммінга, побудованого за певним алгоритмом.

Для перевірки коду Хеммінга на наявність помилки і її виправлення (коригування коду) створюється послідовність $s_1 s_2 s_3$. Значення s_1, s_2, s_3 визначаються алгоритмом

$$\begin{aligned} s_1 &= r_1 \oplus i_1 \oplus i_2 \oplus i_3; \\ s_2 &= r_2 \oplus i_2 \oplus i_3 \oplus i_4; \\ s_3 &= r_3 \oplus i_1 \oplus i_2 \oplus i_4. \end{aligned}$$

Послідовність $s_1s_2s_3$ являє собою поєднання результатів перевірки на парність відповідних символів кодової групи і характеризує конфігурацію помилок. При кількості перевірних символів $r = 3$ є вісім можливих поєднань у послідовності $s_1s_2s_3$ ($2^3 = 8$). Нульове поєднання (000) вказує на те, що помилки при прийомі відсутні. Інші можливі поєднання у послідовності $s_1s_2s_3$ нулів і одиниць з відповідними їм помилками у кодовому слові подано в табл. 7.5.

Код Хеммінга (7, 4) можна сформувати з двійкового за допомогою кодера, схему якого зображено на рис. 7.13. Обернене перетворення виконує декодер (рис. 7.14).

Таблиця 7.4
Кодові слова коду Хеммінга маркування (7, 4)

$k = 4$				$r = 3$		
i_1	i_2	i_3	i_4	r_1	r_2	r_3
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	1	1
0	0	1	0	1	1	0
0	0	1	1	1	0	1
0	1	0	0	1	1	1
0	1	0	1	1	0	0
0	1	1	0	0	0	1
0	1	1	1	0	1	0
1	0	0	0	1	0	1
1	0	0	1	1	1	0
1	0	1	0	0	1	1
1	0	1	1	0	0	0
1	1	0	0	0	1	0
1	1	0	1	0	0	1
1	1	1	0	1	0	0
1	1	1	0	1	1	1

Таблиця 7.5
Визначення за поєднанням $s_1s_2s_3$ помилки у кодовому слові

Синдром	001	010	011	100	101	110	111
Конфігурація помилок	0000001	0000010	0001000	0000100	1000000	0010000	0100000
Помилка в символі	r_3	r_2	i_4	r_1	i_1	i_3	i_2

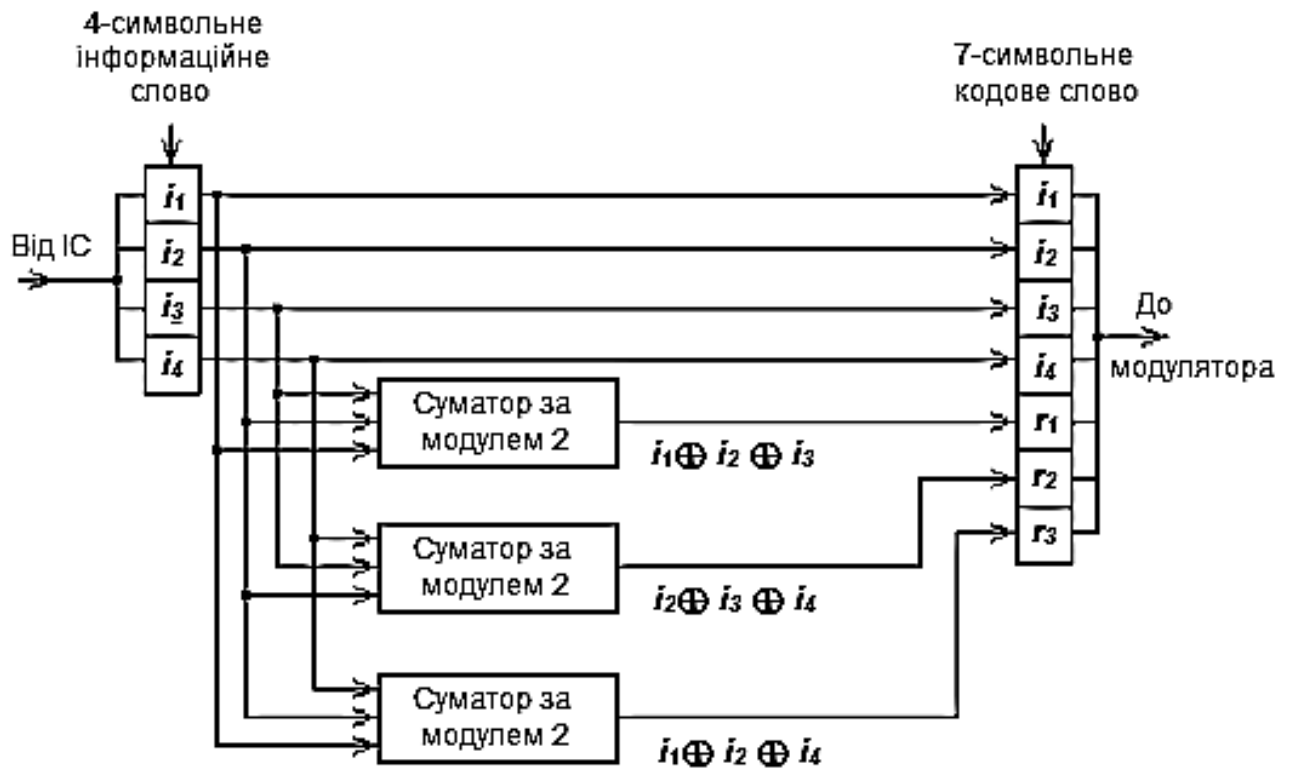


Рис. 7.13. Схема кодера коду Хеммінга (7, 4)

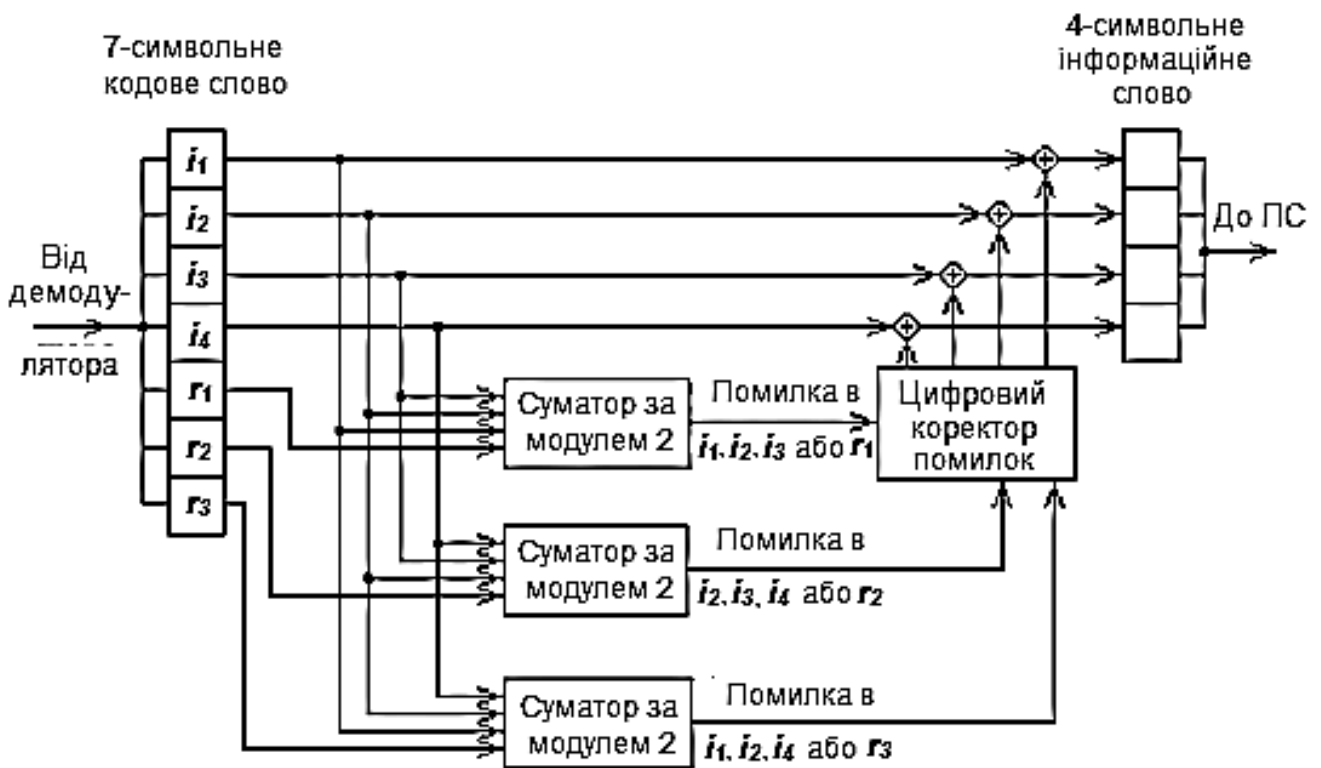


Рис. 7.14. Схема декодера коду Хеммінга (7, 4)

8. ЕЛЕМЕНТИ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБ'ЄКТА

У найпростішому випадку цифрова система керування параметром технологічного об'єкта містить цифровий компаратор, пристрій задання рівня контрольованого параметра (задавач) і за необхідності пристрій індикації поточного значення регульованого параметра або його заданого рівня (рис. 8.1).

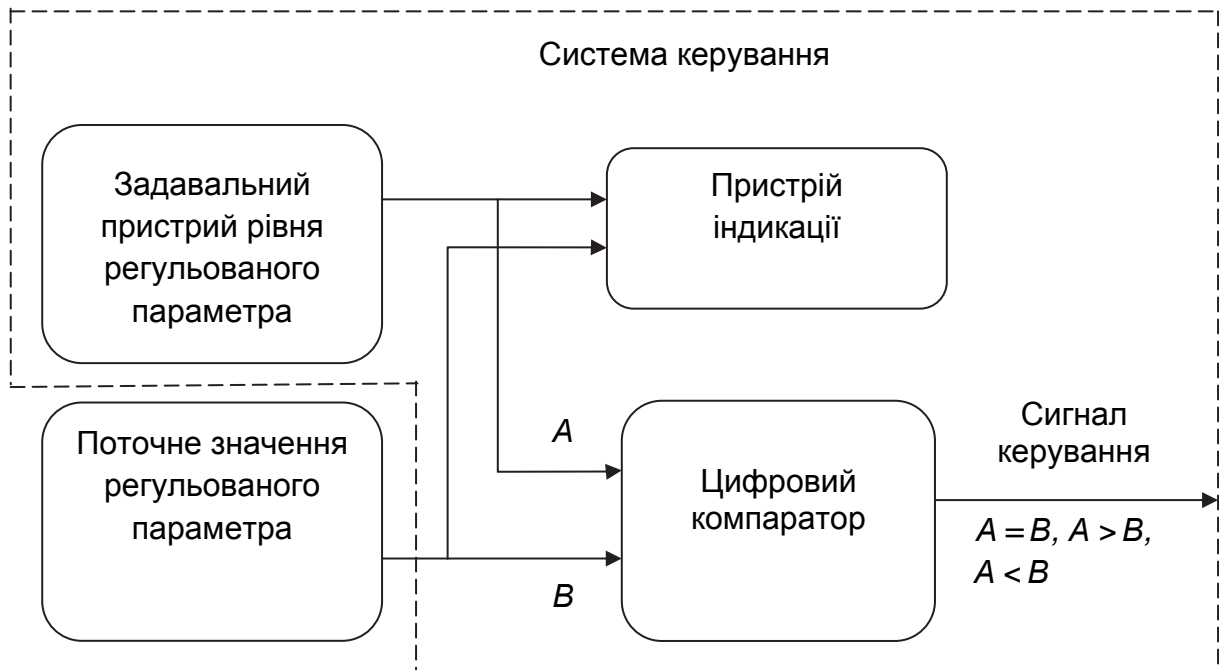


Рис. 8.1. Система керування технологічним параметром найпростішого типу

8.1. Пристрої порівняння сигналів

Цифровий компаратор (від англ. compare – порівнювати, звіряти) – комбінаційна схема, що здійснює порівняння двох багаторозрядних чисел, заданих у двійковому (двійково-десятковому) коді. Компаратори належать до арифметичних пристроїв. Залежно від схемного виконання компаратори можуть визначати рівність $A = B$ (A і B – незалежні числа з рівною кількістю розрядів) або один з видів нерівності: $A < B$ або $A > B$. Результат порівняння відображається логічним рівнем на відповідному виході. Мікросхеми – цифрові компаратори – виконують зазвичай всі ці операції і мають три виходи. Цифрові компаратори широко застосовуються для виявлення потрібного числа (слова) у потоці цифрової інформації, позначення часу в годинних приладах, виконання умовних переходів в обчислювальних пристроях і т. п.

На схемах компаратори кодів позначаються двома символами рівності: «= =». Прикладом мікросхеми компаратора кодів може бути СП1 – чотирирозрядний компаратор кодів, що порівнює величини кодів і видає інформацію про рівність кодів або про те, який код більше.

На рис. 8.2, а, б показано два варіанти позначення чотирирозрядного компаратора кодів СП1, на рис. 8.2, в – маркування виводів (цоколівка) компаратора К555СП1.

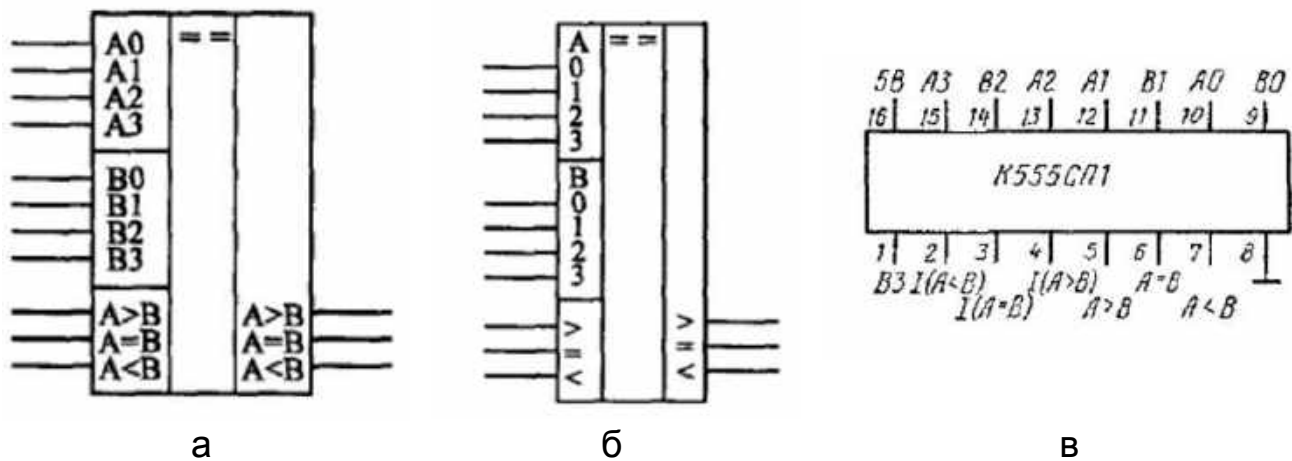


Рис. 8.2. Чотирирозрядний компаратор кодів СП1:
а, б – варіанти позначення; в – маркування виводів

Компаратор СП1 має вісім входів для порівняння двох чотирирозрядних кодів, які охоплюють А0...А3 для першого числа і В0...В3 – для другого, три керувальних входи для збільшення розрядності ($A > B$, $A < B$, $A = B$) і три виходи результуючих сигналів ($A > B$, $A < B$, $A = B$). Для зручності на схемах керувальні входи і виходи іноді позначають просто знаками «>», «<» і «=» (див. рис. 8.2, б). Нульові розряди кодів (А0 і В0) – молодші, треті розряди (А3 і В3) – старші.

Опис компаратора зазвичай подається у формі таблиці, в якій наводяться співвідношення окремих розрядів вхідних шин, входів збільшення каскадів і виводів. Опис цифрового компаратора СП1 (мікросхеми К555СП1, К531СП1 і КР1533СП1) наведено в табл. 8.1.

Якщо використовується одиночна мікросхема, то для її належного функціонування достатньо подати одиницю на вхід $I(A = B)$, а стани входів $I(A < B)$ і $I(A > B)$ не є важливими (X): на них можна подати як нуль, так і одиницю. Полярність вихідних сигналів компаратора СП1 – позитивна (активний рівень – одиниця).

Шість останніх рядків табл. 8.1 відображають режим збільшення каскадів, яке може бути послідовним або паралельним. При послідовному збільшенні виходи $A > B$, $A = B$ і $A < B$ від схеми, яка аналізувала молодші

Таблиця 8.1

Стан цифрового компаратора СП1

Вхід порівняння даних				Вхід збільшення каскадів			Вихід		
A_3, B_3	A_2, B_2	A_1, B_1	A_0, B_0	$I(A > B)$	$I(A < B)$	$I(A = B)$	$A > B$	$A < B$	$A = B$
$A_3 > B_3$	X	X	X	X	X	X	B	H	H
$A_3 < B_3$	X	X	X	X	X	X	H	B	H
$A_3 = B_3$	$A_2 > B_2$	X	X	X	X	X	B	H	H
$A_3 = B_3$	$A_2 < B_2$	X	X	X	X	X	H	B	H
$A_3 = B_3$	$A_2 = B_2$	$A_1 > B_1$	X	X	X	X	B	H	H
$A_3 = B_3$	$A_2 = B_2$	$A_1 < B_1$	X	X	X	X	H	B	H
$A_3 = B_3$	$A_2 = B_2$	$A_1 = B_1$	$A_0 > B_0$	X	X	X	B	H	H
$A_3 = B_3$	$A_2 = B_2$	$A_1 = B_1$	$A_0 < B_0$	X	X	X	H	B	H
$A_3 = B_3$	$A_2 = B_2$	$A_1 = B_1$	$A_0 = B_0$	B	H	H	B	H	H
$A_3 = B_3$	$A_2 = B_2$	$A_1 = B_1$	$A_0 = B_0$	H	B	H	H	B	H
$A_3 = B_3$	$A_2 = B_2$	$A_1 = B_1$	$A_0 = B_0$	H	H	B	H	H	B
$A_3 = B_3$	$A_2 = B_2$	$A_1 = B_1$	$A_0 = B_0$	X	X	B	H	H	B
$A_3 = B_3$	$A_2 = B_2$	$A_1 = B_1$	$A_0 = B_0$	B	B	H	H	H	H
$A_3 = B_3$	$A_2 = B_2$	$A_1 = B_1$	$A_0 = B_0$	H	H	H	B	B	H

Примітка. X – стан виведення – будь-який (нуль або одиниця); B – стан виведення – одиниця; H – стан виведення – нуль.

розряди, слід приєднати до однойменних входів наступного каскаду. Цим способом при двох компараторах СП1 можна порівнювати два восьмирозрядних слова. Приклад компаратора, який порівнює би два n-розрядних

слова, побудованого на трьох мікросхемах СП1, показано на рис. 8.3. Таким чином, можна реалізувати компаратор для будь-якої довжини слова. При цьому треба враховувати, що кожен послідовний каскад додає час затримки поширення сигналу на 15 нс. Приклад паралельного каскадування компараторів кодів показано на рис. 8.4.

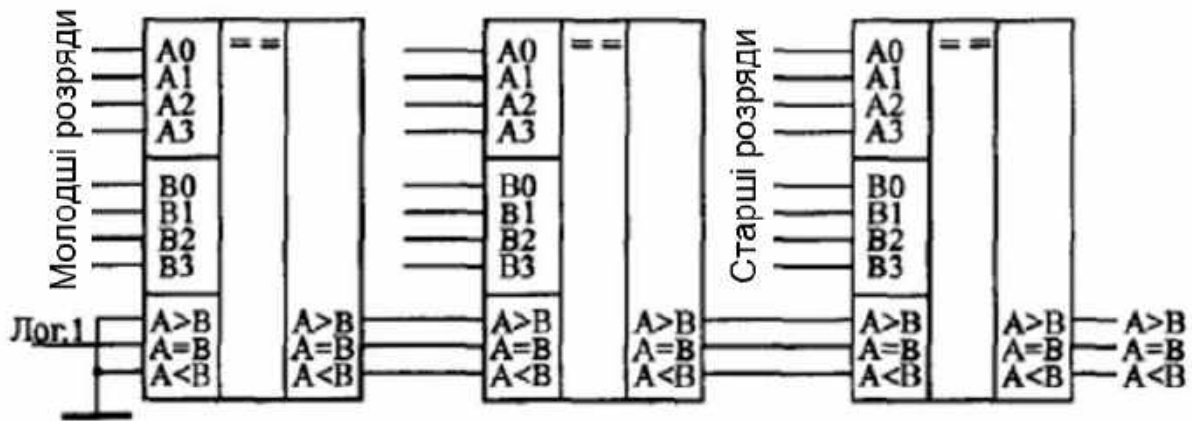


Рис. 8.3. Послідовне каскадування компараторів для аналізу двох 12-розрядних кодових повідомлень

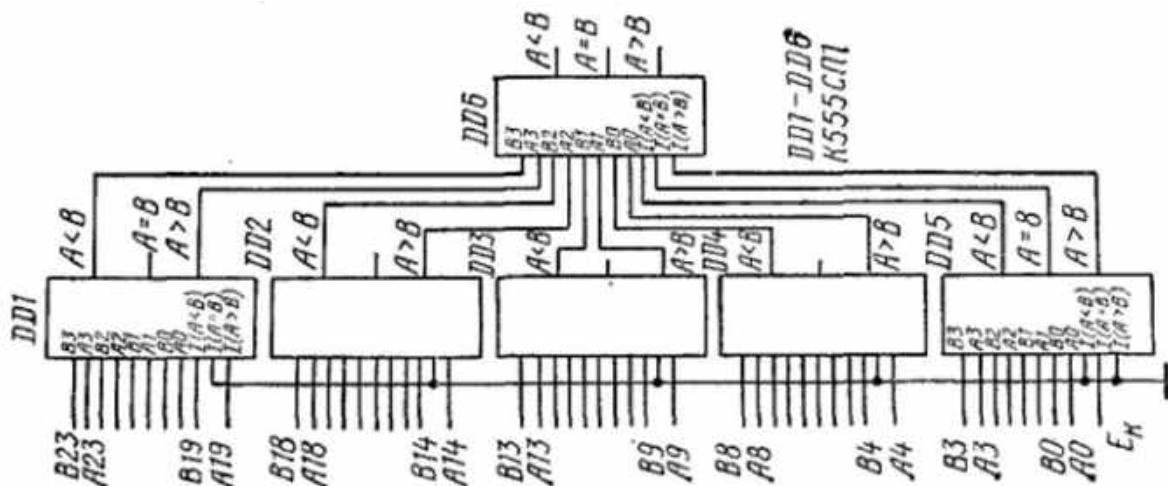


Рис. 8.4. Паралельне каскадування компараторів для аналізу двох 24-розрядних кодових повідомлень

Одне з основних застосувань компараторів кодів – визначення рівності (селектування) вхідних кодів. У цьому випадку досить мати інформацію тільки про збіг кодів на входах компаратора, а не про співвідношення їх величин. Еталонний код (із задавального пристрою рівня регульованого параметра) подається на один вхід компаратора, а змінюваний код (вхідний) – на інший вхід. Використовується тільки вихід рівності кодів $A = B$. Для подібних застосувань випускаються спеціальні компаратори, що ви-

значають тільки збіг кодів. Прикладами можуть бути 8-розрядні мікросхеми SN74ALS520, SN74ALS521, DC102A фірми Dionics (російський аналог – КР559СК1), а також 6-розрядна мікросхема DM8136 фірми National Semiconductors (російський аналог – КР559СК2).

На рис. 8.5 показано застосування компараторів SN74ALS521 для визначення рівності (селектування) 16-розрядних кодових слів. Інверсний сигнал з виходу першої мікросхеми подається на інверсний вхід дозволу другої мікросхеми, вихідний сигнал якої (негативний імпульс) говорить про збіг вхідного і заданого кодів.

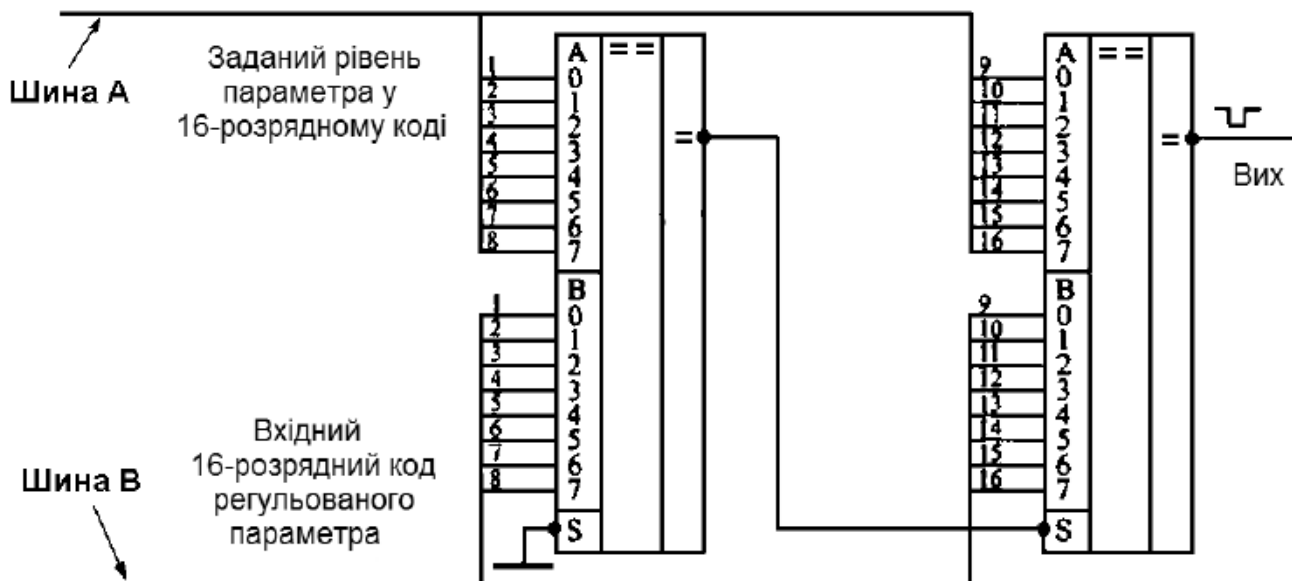


Рис. 8.5. Визначення рівності 16-розрядних кодів

8.2. Задання контрольованого рівня технологічного параметра

У найпростішому випадку еталонний рівень технологічного параметра можна задати, сформувавши на одному зі входів компаратора відповідний двійковий код. Наприклад, на рис. 8.6 продемонстровано задання таким чином еталонного коду 0101 на вході компаратора A0...A3.

Схеми, аналогічні показаній на рис. 8.6, не дозволяють оперативно змінювати еталонний рівень контрольованого параметра. До того ж більш звично використовувати для задання рівня десяткову систему. Тому на практиці рівень контрольованого параметра задають за допомогою децимальних (декадних) перемикачів. Зовнішній вигляд конструкції з чотирьох декадних перемикачів, зібраних в єдиний пакет, показано на рис. 8.7, а, на рис. 8.7, б – позначення такого перемикача відповідно до ГОСТ 2.755-87. На обох рисунках на перемикачах виставлено число «1753» в десятковому коді.

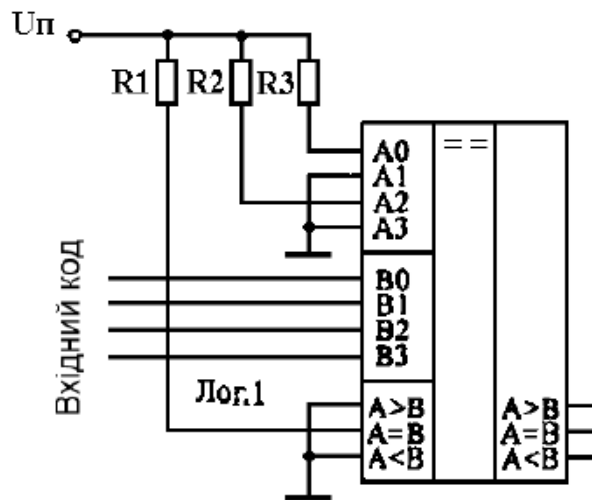


Рис. 8.6. Формування еталонного коду на вході компаратора

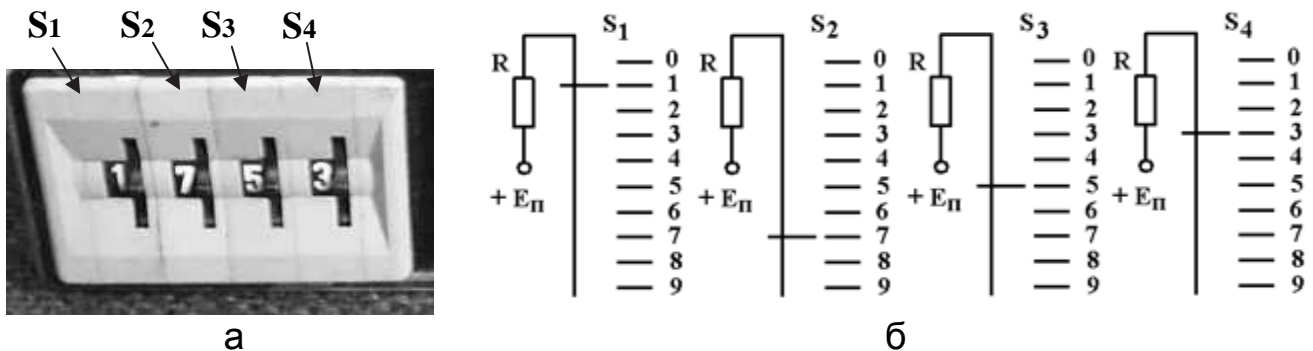


Рис. 8.7. Зовнішній вигляд конструкції з чотирьох декадних перемикачів (а); зображення перемикачів на електричних схемах (б)

8.2.1. Пріоритетні шифратори

Перетворення заданого у десятковому коді числа на двійковий код здійснюється за допомогою шифратора (кодера). Розрізняють шифратори повні й неповні, пріоритетні й непріоритетні:

повний шифратор – шифратор з n виходами і $2n$ входами;

неповний шифратор – шифратор з кількістю входів менше $2n$;

пріоритетний шифратор – шифратор, який при одночасній подачі двох і більше сигналів на входи формує на виході двійковий код, еквівалентний десятковому номеру старшого вхідного сигналу. Таким чином, пріоритетний шифратор кодує вхід, що має найвищий пріоритет.

Повними пріоритетними шифраторами $8 \rightarrow 3$ є мікросхеми K155IB1 (зарубіжний аналог – SN74148N) і K555IB1 (аналог – SN74LS148N), неповним пріоритетним шифратором $10 \rightarrow 4$ – K555IB3 (аналог – SN74LS147N). Маркування виводів мікросхеми IB1 показано на рис. 8.8, а, мікросхеми IB3 – на рис. 8.8, б.

Стан виходів пріоритетного шифратора ІВ1 визначається станом входів і наведено в табл. 8.2. У мікросхеми ІВ1 вісім інформаційних входів 0–7 і вхід дозволу роботи Е1 (Е1 = 0 – робота дозволена; Е1 = 1 – робота заборонена). Виходів у мікросхеми п'ять: три інверсних вихідного коду (А0, А1, А3), Е0 – ознака подачі вхідного сигналу і GS – перенесення.

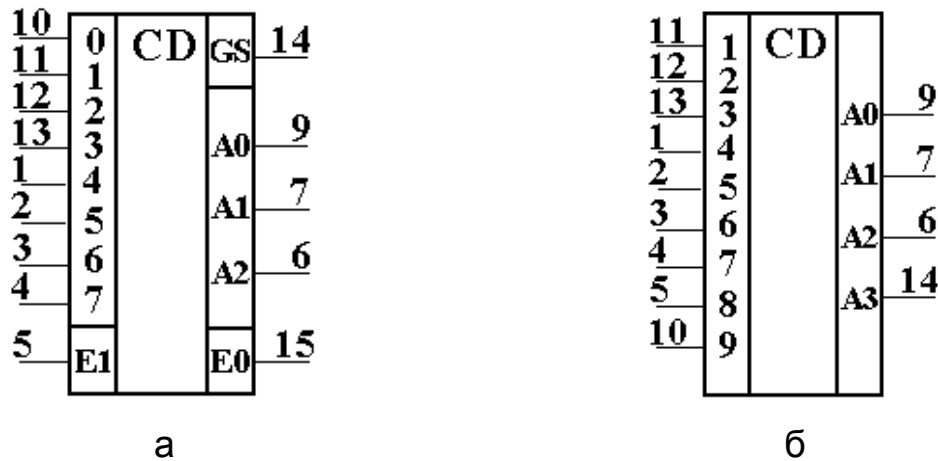


Рис. 8.8. Маркування виводів мікросхем:
 а – шифратора ІВ1 (мікросхеми К155ІВ1 і К555ІВ1);
 б – шифратора ІВ3 (мікросхема К555ІВ3)

Таблиця 8.2

Таблиця істинності пріоритетного шифратора ІВ1

Входи									Виходи				
E1	0	1	2	3	4	5	6	7	A2	A1	A0	GS	E0
1	X	X	X	X	X	X	X	X	1	1	1	1	1
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
0	X	X	X	X	X	X	X	0	0	0	0	0	1
0	X	X	X	X	X	X	0	1	0	0	1	0	1
0	X	X	X	X	X	0	1	1	0	1	0	0	1
0	X	X	X	X	0	1	1	1	0	1	1	0	1
0	X	X	X	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1
0	X	X	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1
0	X	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1

За наявності на всіх інформаційних входах мікросхеми логічної одиниці на виходах А0, А1, А3 і Е0 буде логічна одиниця, на виході GS –

логічний нуль. При подачі логічного нуля на будь-який з інформаційних входів 0–7 на виходах A0, A1, A3 з'явиться інверсний код, що відповідає номеру входу, на який подано логічний нуль, а на виході E0 – логічний нуль, що є ознакою подачі вхідного сигналу, на виході GS – логічна одиниця, яка забороняє роботу інших мікросхем IB1 при їх каскадному з'єднанні. Якщо логічний нуль буде поданий на кілька інформаційних входів мікросхеми, вихідний код буде відповідати входу з великим номером.

При значенні E1 – логічна одиниця (заборона роботи) на всіх шести виходах мікросхеми теж встановлюється логічна одиниця.

Для нарощування розрядності перетворення застосовують каскадне з'єднання мікросхем IB1. На рис. 8.9 зображено схему шифрування 16 → 4, побудовану на двох повних пріоритетних шифраторах 8 → 3 IB1.

Коректна робота пріоритетного шифратора 16 → 4 забезпечується зв'язком виходу GS мікросхеми старших розрядів DD2 зі входом дозволу роботи E1 мікросхеми молодших розрядів DD1. подача активного сигналу (логічного нуля) на один зі входів 0–7 DD1 за наявності на виході GS DD2, а відповідно, і на вході E1 DD1 сигналу логічного нуля, що дозволяє роботу схеми DD1, приводить до появи на виходах A0 – A2 схеми (IMC DD3) молодших трьох розрядів прямого вихідного коду, еквівалентного десятковому номеру активізованого входу. Його старший розряд A3 (визначається виходом E0 DD1) дорівнює нулю.

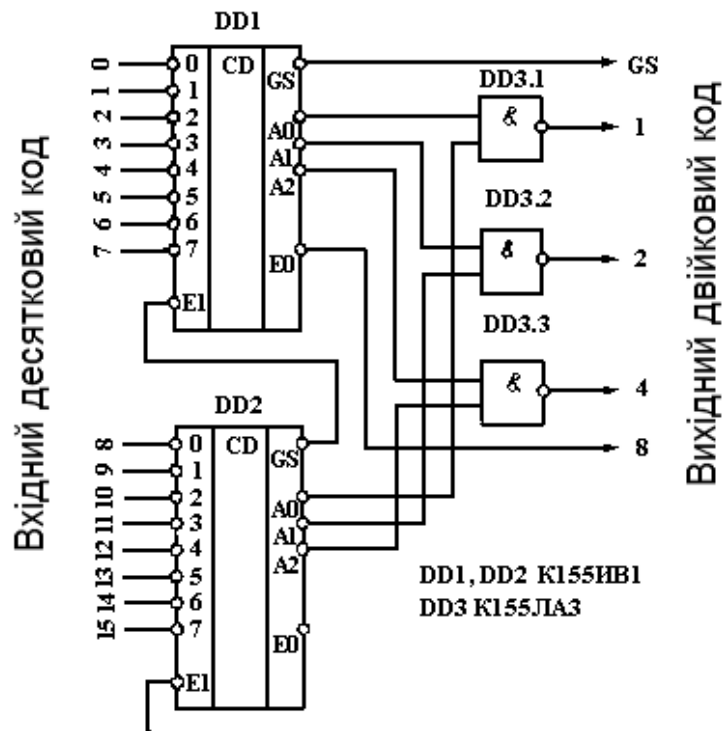


Рис. 8.9. Пріоритетний шифратор 16 → 4, побудований на двох пріоритетних шифраторах 8 → 3 серії K155IB1

Активний сигнал, поданий на один зі входів 8–15 через вихід GS мікросхеми DD2, забороняє роботу схеми DD1. У цьому випадку молодші розряди вихідного коду визначають виходи A0 – A2 DD2, а старший розряд A3 дорівнюватиме логічній одиниці.

Аналогічно із застосуванням повних пріоритетних шифраторів 8 → 3 IB1 створюються пріоритетні шифратори більшої розрядності: 32 → 5, 64 → 6 та ін.

Перетворення десяткових чисел від 0 до 9 на двійковий код можна виконати за допомогою мікросхеми ІМС К555ІВ3 – неповного пріоритетного шифратора 10 → 4 (див. рис. 8.8, б; табл. 8.3). Шифратор ІВ3 має дев'ять інформаційних входів від 1 до 9 (активний логічний нуль) і чотири виходи A0 – A3 інверсного вихідного коду і перетворює вхідні десяткові сигнали на вихідний чотирирозрядний двійковий код. Нуль кодується на виході мікросхеми, якщо на всі дев'ять входів надійшли сигнали логічної одиниці, тому входу для нуля немає.

Таблиця 8.3

Таблиця істинності пріоритетного шифратора К555ІВ3

Входи									Виходи			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	A3	A2	A1	A0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
X	X	X	X	X	X	X	X	0	0	1	1	0
X	X	X	X	X	X	X	0	1	0	1	1	1
X	X	X	X	X	X	0	1	1	1	0	0	0
X	X	X	X	X	0	1	1	1	1	0	0	1
X	X	X	X	0	1	1	1	1	1	0	1	0
X	X	X	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1
X	X	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
X	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

8.3. Відображення інформації у системах керування

8.3.1. Світлодіодні індикатори

Найпростішим пристроєм індикації є світлодіод (англ. LED – light emitting diode) – напівпровідниковий прилад, що випромінює світло при пропущенні через нього електричного струму. Принцип його дії оснований на фізичному явищі виникнення світлового випромінювання при проходженні електричного струму через рп-перехід. Світлодіоди належать до

активних пристроїв індикації, безпосередньо перетворюють електричний струм на світловий потік. Довжина хвилі (колір) визначається типом використовуваних напівпровідникових матеріалів, що утворюють рп-перехід. Зовнішній вигляд деяких світлодіодів, УГП та вольт-амперну характеристику показано на рис. 8.10. Основні характеристики деяких типів світлодіодів наведено в табл. 8.4.

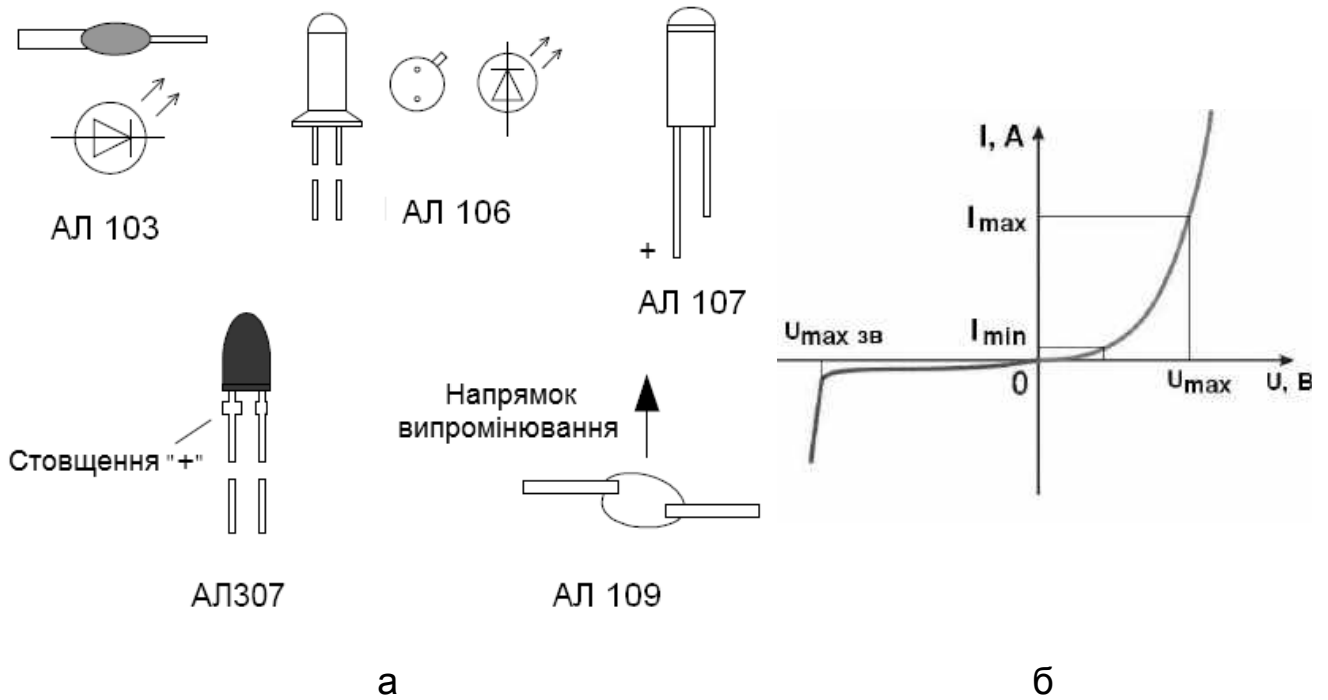


Рис. 8.10. Зовнішній вигляд світлодіодів і їх позначення (а), типова вольт-амперна характеристика (б)

Таблиця 8.4

Основні параметри світлодіодів

Тип світлодіода	Колір	Сила світла, мкд	Прямий струм, мА	Пряма напруга, В
АЛ102	Червоний	0,13	5	2,8
АЛ102БМ	Червоний	2	10	2,8
АЛ102ВМ	Зелений	0,45	20	2,8
АЛ102ГМ	Червоний	0,4	10	2,8
АЛ102ДМ	Зелений	0,6	5	2,8
АЛ307	Червоний	0,15	10	2
АЛ307БМ	Червоний	0,9	10	2
АЛ307ДМ	Жовтий	0,4	10	2,5
АЛ307	Жовтий	1,5	10	2,5

До основних переваг світлодіодів належать:

- висока механічна міцність і надійність в умовах експлуатації при підвищених вібраціях і прискореннях;
- мініатюрність;
- висока швидкодія;
- високі ККД і ресурс роботи (десятки і сотні тисяч годин);
- велика кількість різних кольорів світіння за можливості регулювання його інтенсивності.

Недоліками є:

- відносно висока вартість;
- невеликий світловий потік від одного елемента;
- погіршення параметрів світлодіодів з часом (ефект «старіння»).

Типові схеми підключення світлодіодів зазвичай будуються із застосуванням елементів з відкритим колекторним виходом (рис. 8.11).

Величина струмообмежувального резистора R1 у наведених схемах розраховується з умови забезпечення номінального робочого струму світлодіода (див. табл. 8.3).

На основі світлодіодних напівпровідникових структур виготовляються різні світлодіодні індикатори: однорозрядні знаковителувальні (семисегментні, чотирнадцяти сегментні та ін.), багаторозрядні цифробуквені, шкальні, мнемонічні, матричні. З технічними характеристиками таких індикаторів можна ознайомитися в роботі [32].

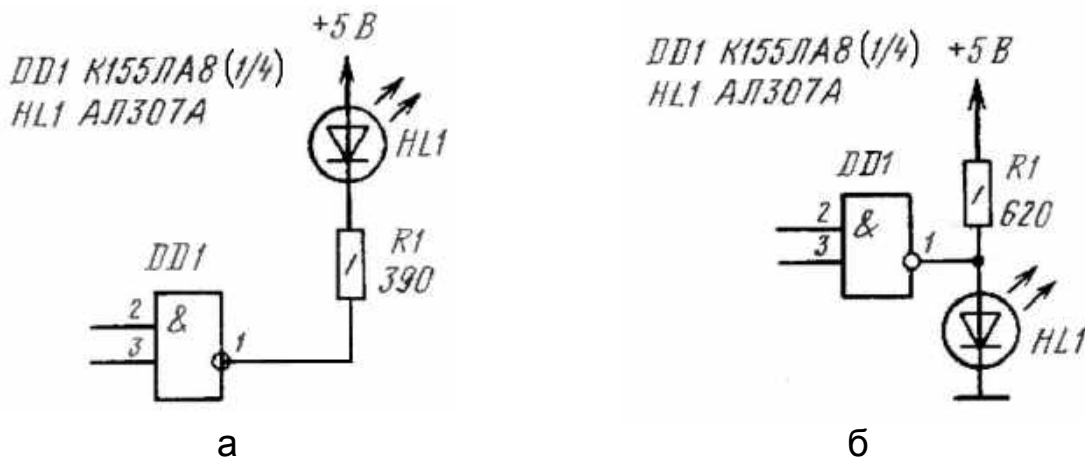


Рис. 8.11. Схема підключення світлодіода до елемента І-НЕ з відкритим колекторним виходом: а – з низькою напругою виходу; б – з високою напругою виходу

8.3.2. Семисегментні індикатори

Семисегментний індикатор є найбільш простим пристроєм для відображення арабських цифр. Конструктивно він складається з семи окремих світлодіодів *a, b, c, d, e, g, f* в одному виробі, в яких з'єднані аноди або катоди (рис. 8.12).

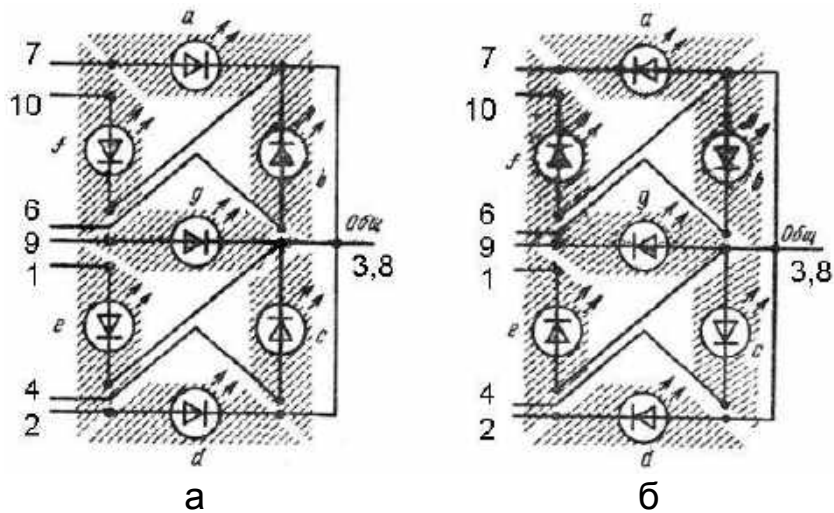


Рис. 8.12. Семисегментні індикатори:
а – зі з'єднаними катодами; б – зі з'єднаними анодами

Типовими представниками семисегментних світлодіодних індикаторів є індикатори серії АЛ304. На рис. 8.13, а показано зовнішній вигляд індикаторів, на рис. 8.13, б – умовне графічне позначення з маркуванням виводів, на рис. 8.13, в – габаритні розміри.

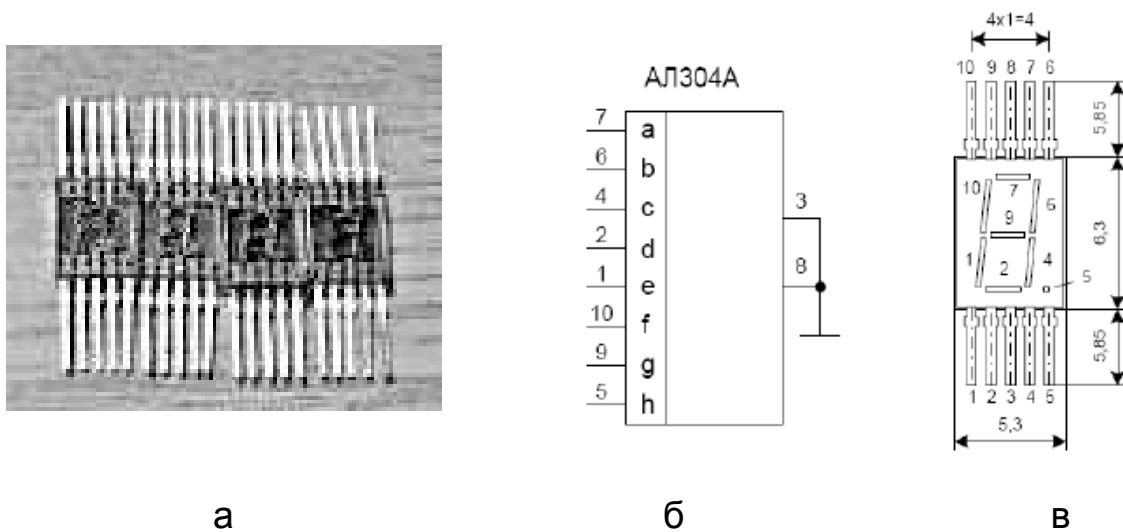


Рис. 8.13. Семисегментний індикатор АЛ 304: а – зовнішній вигляд;
б – УГП і маркування виводів; в – габаритні розміри

Індикатори АЛ304А – АЛ304Г є знаковинтезувальні, в їх основі – сполуки арсенід – фосфід – галій, отримані за епітаксійно-планарною технологією. Вони призначені для відображення всіх шістнадцятиричних цифр: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, А, В, С, D, Е і F. Індикатори мають сім сегментів і децимальну точку (вивід 5 мікросхеми індикатора). Випускаються у пластмасовому корпусі. Висота знака – 3 мм.

Для відображення багаторозрядної інформації можуть використовуватися однорозрядні індикатори, розташовані поряд. Більш зручним у цьому випадку є використання індикаторів, в яких в одному корпусі розташовано кілька однорозрядних індикаторів. Там же можуть бути встановлені додаткові світлодіоди для виведення додаткової інформації – точки, стрілки, знаки та ін. Прикладом такого багаторозрядного індикатора є семисегментний індикатор фірми Kingbright BA56, показаний на рис. 8.14.

Зазвичай у багаторозрядних індикаторах використовують принцип динамічної індикації, при якому всі однойменні виводи цифр об'єднують і підключають до одного виходу дешифратора, а цифри вибирають шляхом перемикання їх загальних анодних (або катодних) виводів, підключених до іншого виходу. Частоту перемикання вибирають з умови забезпечення відсутності мерехтіння завдяки інерційності зору людини.

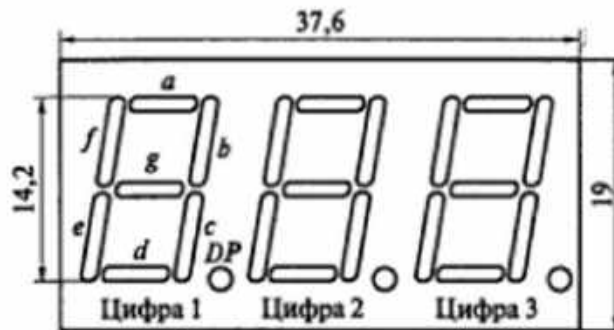


Рис. 8.14. Трирозрядний семисегментний індикатор фірми Kingbright BA56

Для роботи семисегментних індикаторів необхідно виконати перетворення двійкового коду на код сегментного індикатора. Для вирішення цього завдання були створені спеціалізовані мікросхеми – семисегментні дешифратори. Схему підключення індикатора АЛ 304А до семисегментного дешифратора К514ІД1 показано на рис. 8.15.

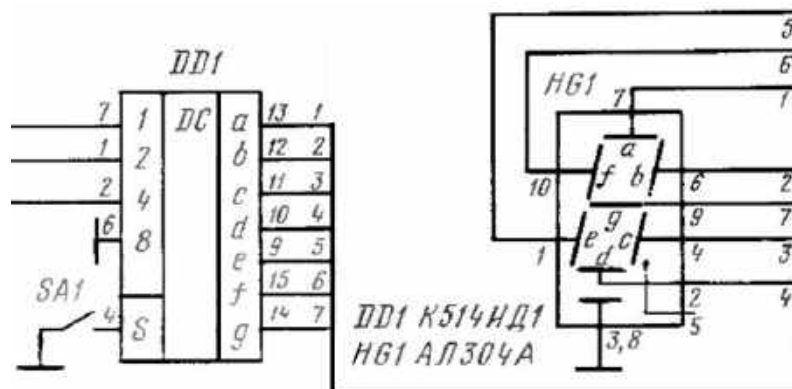


Рис. 8.15. Перетворення двійкового коду на код семисегментного індикатора

8.3.3. Матричні індикатори

Для відображення складної інформації у вигляді букв, знаків, цифр і символів використовують матричні індикатори. У таких індикаторах світлодіоди розміщуються на перетині рядків і стовпців матриці. Прикладом індикатора з матрицею 5 x 7 є індикатор АЛС 357А (аналог – 1740R). Схематичне зображення матриці такого індикатора, нумерацію виводів і його габаритні розміри показано на рис. 8.16.

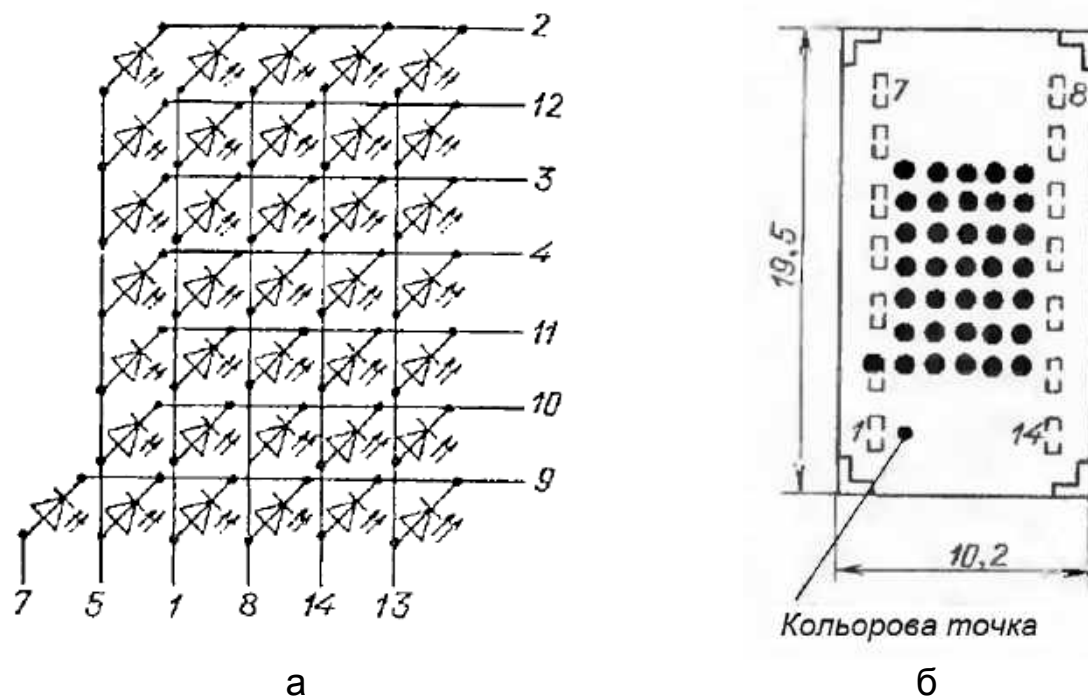


Рис. 8.16. Матричний індикатор АЛС 357А:
а – матриця світлодіодів з маркуванням виводів;
б – габаритні розміри і нумерація виводів

Увімкнення будь-якого світлодіода в матриці АЛС 357А (рис. 8.16, а) забезпечується при подачі на відповідний стовпчик матриці сигналу високого рівня, а на відповідний рядок – сигналу низького рівня. При вибраному стовпці одночасно можна увімкнути кілька світлодіодів у різних рядках.

Кількість рядків і стовпців матриці у різних індикаторів може бути різною. Наприклад, індикатор АЛС 347а (аналог – SLA 1232) складається з 64 світлодіодів, об'єднаних в матрицю з восьми рядків і восьми стовпців.

При керуванні матричним індикатором необхідно по черзі вибирати стовпці і відповідні світлодіоди в рядках. Цей процес можна забезпечити за допомогою різних мікросхем – спеціалізованих (наприклад, драйвера MAX 7219), регістрів зсуву (мікросхеми 74НС 164 (КР1554ІР8), 74НС299 (КР1554ІР24) та ін.), лічильників-дешифраторів (мікросхеми 4017 і аналогічних), мікросхем пам'яті (К155РЕ21, К155РЕ22, К155РЕ23, К155РЕ24).

8.3.4. Рідкокристалічні індикатори

Рідкокристалічні індикатори (РКІ) належать до пасивних пристроїв відображення інформації, оскільки є пристроями, що модулюють зовнішній світловий потік під впливом електричного поля або струму. На рис. 8.17 зображено зовнішній вигляд РКІ МТ-08S2А виробництва фірми «МЕЛТ».

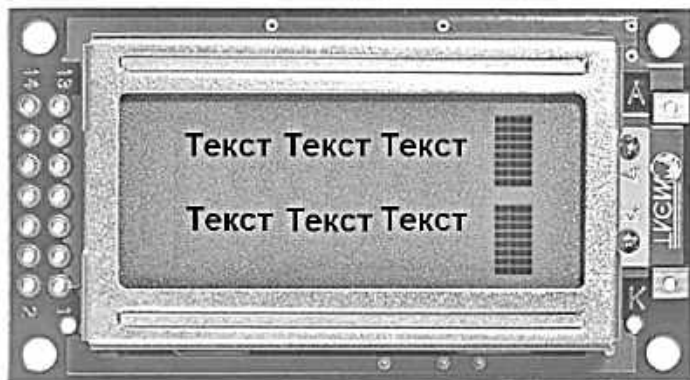


Рис. 8.17. Рідкокристалічний індикатор МТ-08S2А

Рідкокристалічний індикатор МТ-08S2А складається з РК-панелі і контролера керування КБ1013ВГ6 виробництва ВАТ «АНГСТРЕМ» (www.angstrem.ru). Індикатор випускається зі світлодіодним підсвічуванням різних кольорів, він дозволяє відобразити два рядки по вісім символів. Символи відображаються в матриці 5 × 8 точок. Між символами є інтервали шириною в одну відображувану точку.

Кожному відображуваному на РКІ символу відповідає його код в осередку ОЗУ індикатора. Індикатор містить два види пам'яті кодів відображуваних символів і призначеного для користувача знакогенератора, а також логіку для керування ЖК-панеллю. Він може працювати як за 8-, так і 4-бітною шиною даних, виводити миготливий (або немиготливий) курсор двох типів, керувати контрастністю і підсвічуванням. Детально ознайомитися з роботою даного РКІ і аналогічних йому можна на сайті фірми «МЕЛТ» <http://www.melt.com.ru/>.

9. ВИКОНАВЧІ ПРИСТРОЇ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

9.1. Загальні відомості

Для керування значенням параметра технологічного процесу використовують різноманітні виконавчі пристрої. Ця різноманітність обумовлена численністю як фізичних параметрів, так і методів їх регулювання. Узагальнену структурну схему виконавчого пристрою можна подати у вигляді, показаному на рис. 9.1.

Слід зазначити, що зображена на рис. 9.1 схема є досить умовною і може видозмінюватися у кожному конкретному випадку. Згідно з визначенням, наведеним у ГОСТ 14691-69, виконавчий пристрій (ВП) – це пристрій

системи автоматичного керування або регулювання, що впливає на процес відповідно до одержуваної командної інформації. В ньому також уточнюється, що ВП складається з двох функціональних блоків: виконавчого механізму і регулювального органу і для розширення сфери застосування може оснащуватися додатковими блоками (фіксаторами, датчиками положення і т. п.).

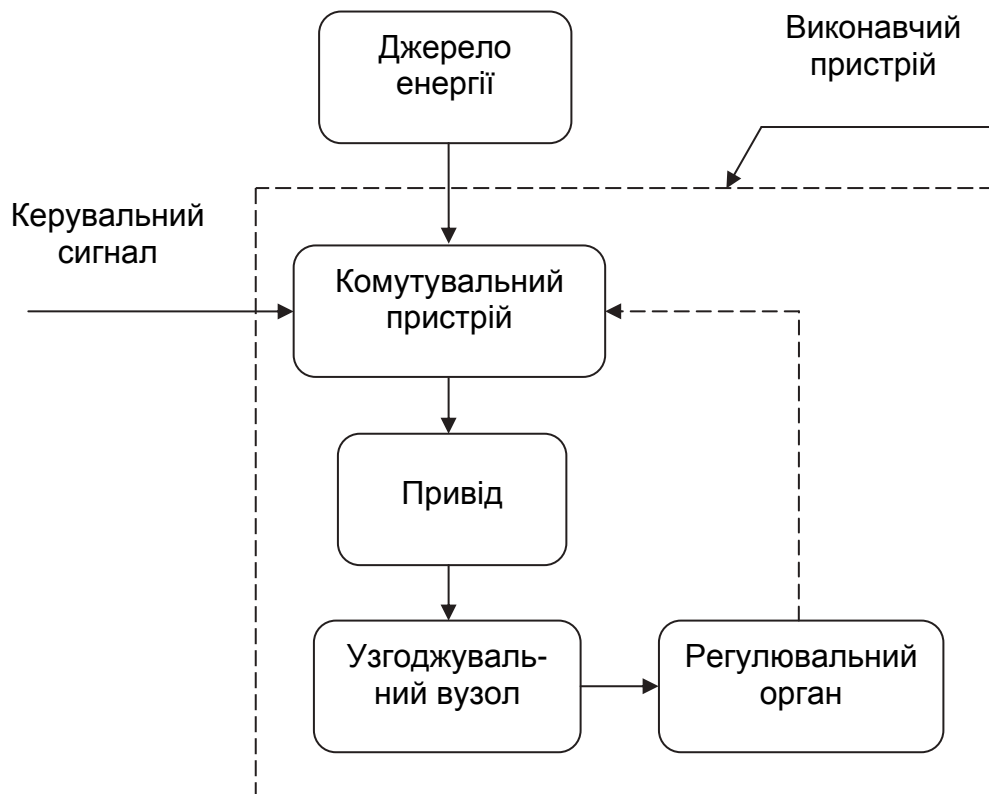


Рис. 9.1. Структурна схема виконавчого пристрою

Як впливає з ГОСТ 14691-69, показані на рис. 9.1 елементи виконавчого пристрою (комутувальний пристрій, привід і узгоджувальний вузол) утворюють виконавчий механізм (ВМ).

Залежно від виду споживаної приводом енергії виконавчі механізми поділяють на такі:

- пневматичні;
- гідравлічні;
- електричні.

Для вмикання ВМ застосовуються комутувальні пристрої, для вмикання електричного приводу – різні реле і магнітні пускачі (контактори). Узгоджувальні вузли в ВМ призначено для передачі впливу на регулювальний орган. До узгоджувальних вузлів належать редуктори, клиноремінні і фрикційні передачі, кулачкові та інші механізми. Регулювальний орган у більшості випадків є досить складним пристроєм і у виконавчому пристрої

здійснює безпосередній вплив на технологічний параметр. Якщо контрольованим параметром є тиск, то регулювальним органом може бути насос, клапан, засувка, якщо температура – то нагрівач або охолоджувач (холодильник). Якщо параметром є переміщення, то безпосереднім регулювальним органом можуть бути елементи передачі руху від приводу (двигуна) до робочого органу (наприклад, коробка передач).

Більш детальна класифікація виконавчих механізмів і регулювальних органів за різними критеріями, принципи їх роботи, технічні характеристики наведено в роботах [28 – 30].

9.2. Комутувальні пристрої

У сучасних дискретних системах автоматики для комутації, тобто підключення джерела енергії до приводу виконавчого механізму або відключення від нього, широко застосовуються контактні і безконтактні релейні пристрої. До контактних належать різноманітні електромеханічні реле, магнітні пускачі, реле захисту і т. п. У безконтактних пристроях ключовим елементом є керований напівпровідниковий прилад – транзистор або тиристор. У ряді випадків електромагнітні реле є безпосереднім виконавчим механізмом.

9.2.1. Електромагнітні реле

Електромагнітне реле – це пристрій, в якому здійснюється стрибоко-подібне змінення (замикання, розмикання, перемикання) вихідного сигналу під впливом керувального (вхідного) сигналу, який змінюється безперервно у певних межах. Пристрої релейного типу (реле) широко застосовуються в системах автоматики, оскільки з їх допомогою можна керувати великими потужностями на виході при малих за потужністю вхідних сигналах.

Історія релейних пристроїв (від англ. «Relay» – змінення, передача) налічує більше 180 років. Появу одного з перших комутаційних реле в 1837 р. пов'язують з ім'ям американського винахідника С. Бризу (Морзе), який створив азбуку Морзе. Конструктивно сучасні реле складаються з тих же елементів – електромагніту, підпружиненого якоря і контактних груп, що й їх історичні прототипи.

Зовнішній вигляд електромагнітного реле з позначенням основних конструктивних елементів показано на рис. 9.2. Основні терміни та визначення, що стосуються електричних реле, наведено в ГОСТ 16022-83 (перевидання 2005 року).

Типову характеристику електромагнітного реле показано на рис. 9.3. Різка перехідна характеристика і наявність в ній гістерезису властиві будь-якому електромагнітному реле.

Основні завдання, які вирішуються за допомогою електромагнітних реле, такі:

- здійснення гальванічної розв'язки між ланцюгами керування і навантаження;
- значне посилення потужності сигналу керування (до декількох тисяч);
- керування за допомогою одного сигналу декількома ланцюгами з різними рівнями напруг і струмів, у тому числі одночасно постійними і змінними.

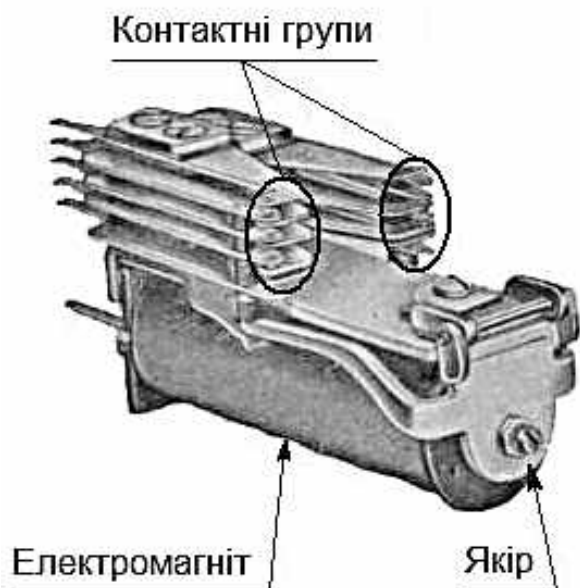


Рис. 9.2. Електромагнітне реле

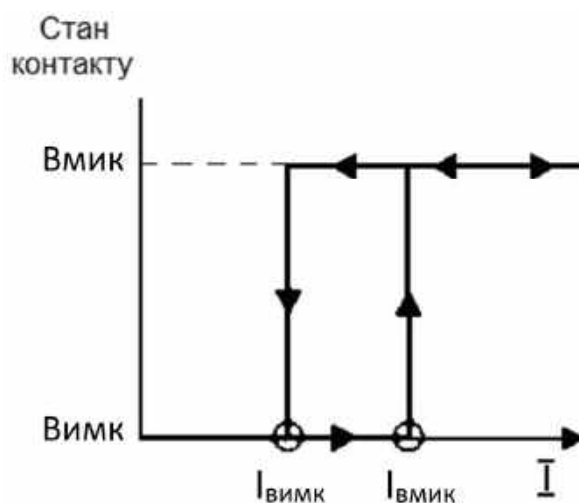


Рис. 9.3. Характеристика електромагнітного реле

До основних параметрів електромагнітних реле належать:

- струм спрацьовування $I_{спр}$ – значення струму в котушці реле, при якому відбувається спрацьовування реле і переключення контактів;
- робочий струм I_p – значення струму в котушці реле, при якому відбувається утримання контактів із заданим зусиллям;
- струм відпускання $I_{відпуск}$ – значення струму в котушці реле, при якому якір реле і контакти повертаються у початковий стан;
- час спрацьовування $t_{спр}$ – інтервал часу з моменту подачі керувального сигналу до моменту вмикання керованого ланцюга;
- час відпускання $t_{відпуск}$ – інтервал часу з моменту зняття керувального сигналу до моменту вимикання керованого ланцюга.

Електромагнітні реле класифікують за різними критеріями: функціями, які вони виконують у системах керування; конструкцією, комутованою потужністю тощо. Реле може реагувати не тільки на значення конкретної

величини, але й на різницю значень (диференціальні реле), на змінення знака величини (поляризовані реле), на швидкість змінення вхідної величини.

За потужністю керування (потужністю, яка споживається обмоткою $P_{\text{КОТ}}$) реле поділяють на високочутливі ($P_{\text{КОТ}} < 0,01$ Вт), чутливі ($P_{\text{КОТ}} = 0,01 \dots 0,05$ Вт) і нормальні ($P_{\text{КОТ}} > 0,05$ Вт). Високочутливі й чутливі реле можуть використовуватися в системах керування з вмиканням їх безпосередньо від мікросхем без проміжних підсилювачів.

За величиною комутованої потужності реле поділяють на такі:

– слабкострумові – реле автоматики і зв'язку; розривна потужність в ланцюгах постійного струму – до 50 Вт, в ланцюгах змінного струму – до 120 ВА;

– нормальної потужності – проміжні реле, здатні комутувати потужність постійного струму до 150 Вт, змінного струму – до 500 ВА;

– сильнострумові підвищеної потужності – за характеристиками наближаються до контакторів, їх розривна потужність перевищує 500 Вт.

Класифікацію реле за комутувальною потужністю зображено на рис. 9.4. Крім того, реле класифікують за родом струму, що живить котушку керування, часом спрацьовування, видом контактів реле, кількістю можливих позиційних станів і т. п.

Умовне графічне позначення і найменування відповідно до ЕСКД котушки електромагнітного реле і його контактів показано на рис. 9.5.

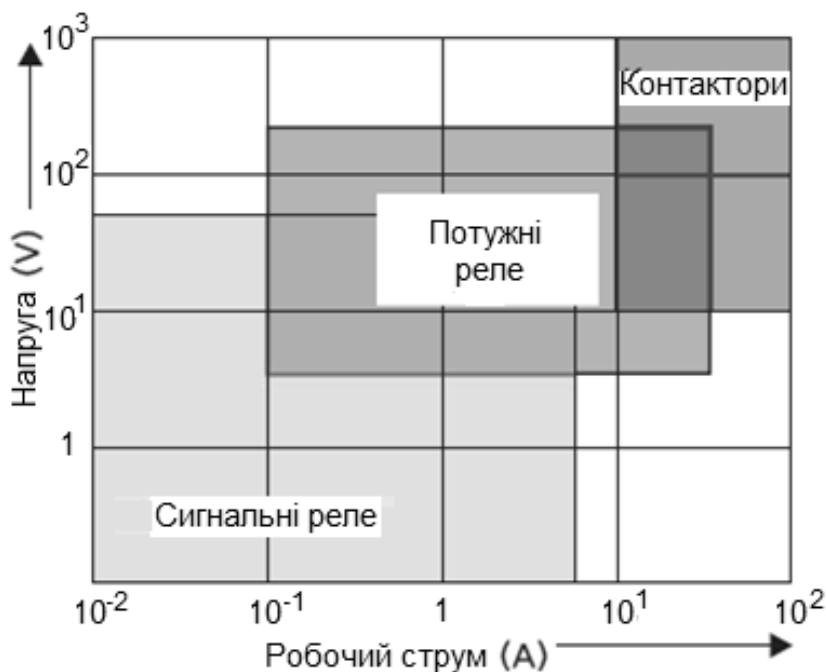


Рис. 9.4. Класифікація реле за комутувальною потужністю

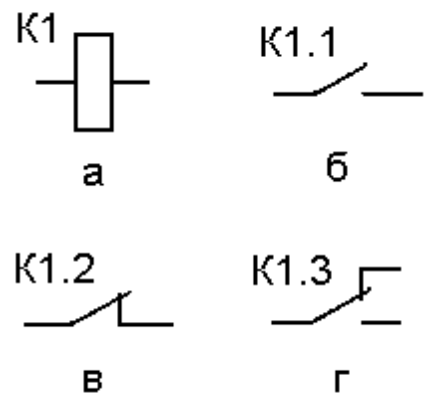


Рис. 9.5. Умовне графічне позначення котушки реле і контактів:

- а – котушка реле;
- б – замикальний контакт;
- в – розмикальний контакт;
- г – перемикальний контакт

При проектуванні вибір типу реле визначається зазначеними характеристиками і параметрами, при цьому перевага віддається тим, які найбільшою мірою задовольняють вимоги розроблюваного пристрою і умови його експлуатації. З технічними характеристиками електромагнітних реле, які випускаються промисловістю, можна ознайомитися в довідковій літературі (наприклад, [33, 34]).

Зазвичай реле постійного струму підключають у ланцюг живлення із застосуванням додаткових елементів. У схемі на рис. 9.6 опір R забезпечує зменшення часу спрацьовування реле, діод VD виконує одночасно дві функції при вимиканні реле: з одного боку, він збільшує час відпускання контактів реле внаслідок ЕРС самоіндукції обмотки котушки реле, з іншого – захищає обмотку котушки від пробоя, що спричиняється перенапруженням.

Різновид електромагнітного реле – магнітний пускач, який широко використовується для вмикання трифазних асинхронних двигунів виконавчих пристроїв. Магнітний пускач – це комутаційний пристрій, призначений для пуску, вимикання, реверсу і захисту електродвигунів від перевантажень. Наявність в його складі теплового реле забезпечує захист електродвигуна від перегрівання струмами, що перевищують номінальне значення, у тому числі при зниженні напруги живлення.

Недопущення повторного вмикання магнітного пускача при появі в мережі раніше зниклої напруги (нульовий захист) досягається за схемою, зображеною на рис. 9.7. Тут самоблокування пускача при вмиканні здійснюється контактом $K1.4$, який шунтує кнопку $S1$ «Пуск». Повторне вмикання двигуна після появи зниклої напруги виключається шляхом зняття котушки пускача з самоблокування за відсутності напруги живлення нормально роз'єднаними контактами $K1.4$.

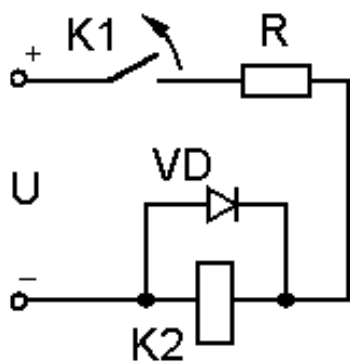


Рис. 9.6. Схема підключення реле постійного струму

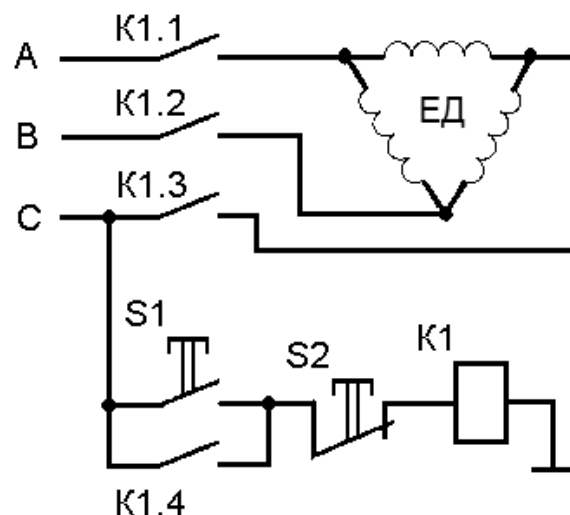


Рис. 9.7. Схема підключення електродвигуна магнітним пускачем, поставленим на самоблокування

Магнітні пускачі мають різне виконання: реверсивний, неревверсивний, з перемиканням обмоток двигуна «зірка-трикутник». Для усунення одночасного вмикання контакторів магнітного пускача під час реверсування в його рухливу систему вбудовують механічне блокування.

Безперебійна робота асинхронних двигунів значною мірою залежить від надійності магнітних пускачів. Вимога високої надійності сучасних магнітних пускачів досягається забезпеченням ресурсу їх роботи на рівні не менше 10 – 20 мільйонів комутаційних циклів.

9.2.2. Рекомендації щодо вибору контактних реле

Надійність роботи електромагнітних реле у виконавчих та інших пристроях різного призначення визначається правильним вибором електричних режимів роботи обмотки реле та його контактів. При проектуванні пристроїв з контактними релейними елементами необхідно враховувати таке:

- робочі напруги і струми в обмотці реле мають знаходитися в межах допустимих значень, зазначених у довідковій і технічній документації;

- при виборі режиму роботи контактів необхідно враховувати величину і рід комутуваного струму, при змінному струмі – його частоту, характер навантаження (активний, реактивний), загальну кількість і частоту комутації;

- при комутації індуктивних навантажень найважчим процесом є розмикання контактами ланцюга, при комутації ємнісних навантажень – процес замикання ланцюга; у разі таких навантажень необхідно знижувати струм через контакти реле;

- при комутації струму паралельно з'єднаними контактами реле сумарний комутований струм не повинен перевищувати максимально допустимого значення для однієї групи контактів.

9.2.3. Безконтактні комутувальні пристрої

Безконтактні пристрої релейного типу створюються на основі напівпровідникових елементів – транзисторів і тиристорів. У практиці керування електроприводом значного поширення набули схеми керування і комутації на тиристорах. Причиною цього була відмінність у методах керування ключовими елементами на транзисторах і тиристорах. Ця відмінність між ними полягає в тому, що для підтримки транзистора в увімкненому стані необхідно є постійна присутність керувального сигналу на вході, а для тиристора – керувальний сигнал після його відкриття може бути знятий.

Типову вольт-амперну характеристику (ВАХ) тиристора показано на рис. 9.8. З неї випливає, що перевести тиристор у відкритий стан можна, збільшуючи пряму напругу на ньому (анод – позитивна напруга, катод – негативна) до значення $U_{пр\ max}$.

У відкритому стані внутрішній опір тиристора є мінімальним, тому він пропускає струм у прямому напрямку, який обмежений тільки параметрами зовнішнього ланцюга. Залежно від типу тиристора спад напруги на ньому у відкритому стані U_{oc} становить від частки вольт до декількох вольтів.

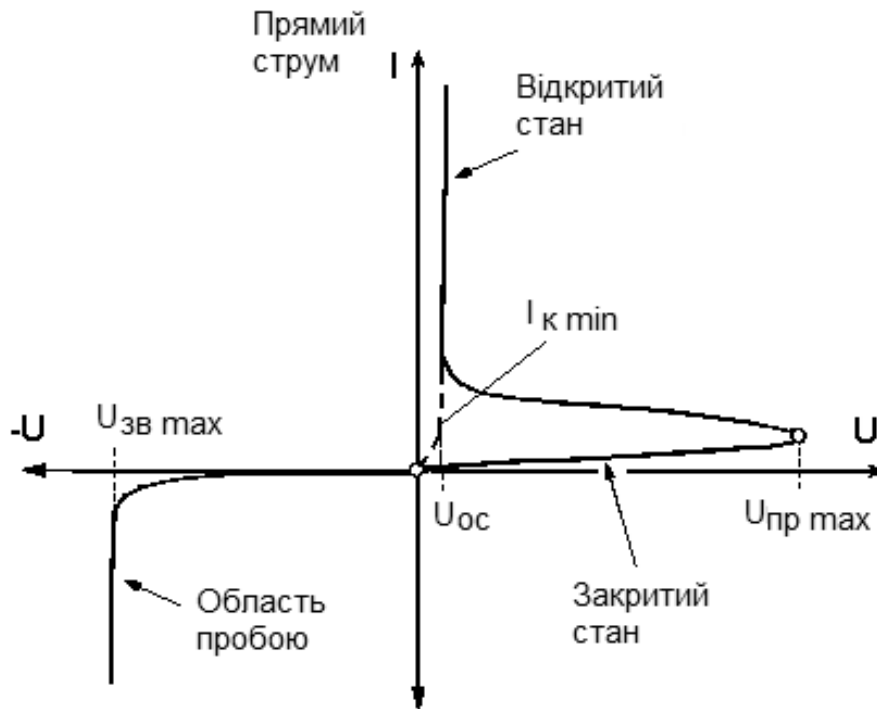


Рис. 9.8. Вольт-амперна характеристика тиристора

При прямій напрузі менше $U_{пр\ max}$ перевести тиристор у відкритий стан («увімкнути») можна шляхом подачі струму керування I_k на керувальний електрод. Після відкриття тиристора струм керування можна вимкнути, оскільки тиристор увесь час буде перебувати у відкритому стані, поки прямий струм через нього не стане менше струму утримання. Ця особливість тиристорів у ряді випадків потребує прийняття спеціальних заходів щодо його закриття, особливо при роботі у ланцюгах постійного струму.

Дотепер розроблено і випускається кілька основних різновидів тиристорів з достатньою кількістю номіналів (у першу чергу, за струмом комутації і зворотною напругою) у кожному різновиді.

Симістор (симетричний тиристор, або тріак) – це тиристор, який здатний у відкритому стані пропускати струм в обох напрямках. Основою симістора є пррпр-структура, що являє собою дві підключені зустрічно-паралельно тиристорні структури. Симістор широко застосовується у ланцюгах змінного струму. Вмикання відбувається під впливом імпульсів струму керування, який залежно від типу симістора повинен або мати по-

зитивну полярність, або бути біполярним (полярність струму керування має збігатися з полярністю струму, що проходить через симістор).

Оптронний тиристор – це тиристор, увімкнення якого здійснюється оптичним сигналом, який створюється вбудованим світлодіодом.

Тиристор, що замикається, – це тиристор, який вмикається і вимикається за допомогою імпульсів струму керування.

Умовні графічні позначення тиристорів показано на рис. 9.9, типові схеми вмикання тиристора за керувальним входом – на рис. 9.10.

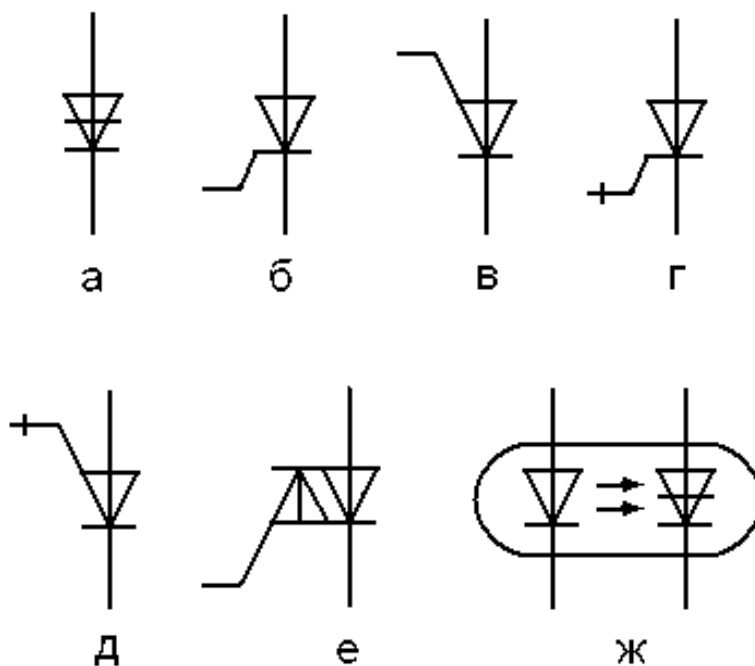


Рис. 9.9. Умовні графічні позначення тиристорів:

а – тиристор діодний (диністор), що замикається у зворотному напрямку;

б – тиристор тріодний, який замикається у зворотному напрямку,

з керуванням за катодом; в – тиристор тріодний, який замикається

у зворотному напрямку, з керуванням за анодом; г – тиристор тріодний,

що вимикається і запирається у зворотному напрямку, з керуванням

за катодом; д – тиристор тріодний, який вимикається і запирається

у зворотному напрямку, з керуванням за анодом;

е – симістор; ж – оптронний тиристор

Вмикання тиристора за схемою рис. 9.10, а відбувається у момент надходження струму, який створюється джерелом U_k . Як такі джерела можна використовувати вихід мікросхеми, окреме джерело живлення і т. п. У схемі, показаній на рис. 9.10, б, додаткове джерело не потрібне, оскільки струм керування створюється напругою живлення $U_{ж}$ при замиканні ключа S. Використання імпульсного трансформатора TH в схемі рис. 9.10, в для вмикання тиристора TS дозволяє здійснити гальванічну розв'язку керува-

льного і силового ланцюгів. Гальванічна розв'язка, але вже оптична, конструктивно вбудована, передбачена в самому оптронному тиристорі, показаному на рис. 9.10, г.

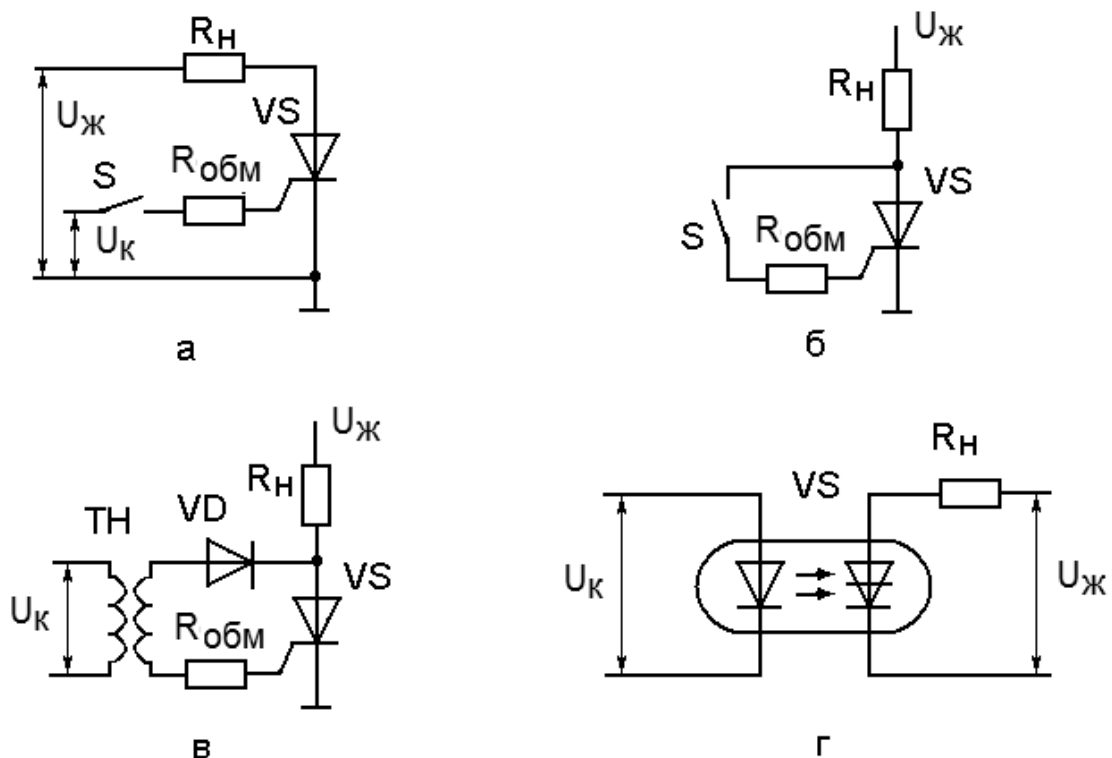


Рис. 9.10. Схеми вмикання тиристорів: а – з використанням керувальної напруги U_k ; б – з використанням анодної напруги; в – із застосуванням імпульсного трансформатора; г – тиристор оптронний

9.2.4. Тиристорні пускачі і контактори

Можливість вмикання тиристорів при позитивній напрузі на аноді, нескладність вмикання, високі частотні характеристики зумовили широке застосування електронних пристроїв на основі тиристорів в елементах автоматики технологічних процесів. Тиристорні пускачі і контактори зараз є основними пристроями для керування асинхронними двигунами, нагрівальними елементами електроустановок та іншими навантаженнями електричних промислових мереж.

Основними перевагами безконтактних тиристорних пускачів і контакторів є:

- можливість плавного пуску і гальмування асинхронних електричних двигунів;
- високий ресурс роботи, обумовлений відсутністю рухомих частин і контактів, що піддаються впливу електричної ерозії;

- можливість комутації електричних ланцюгів з високою частотою (до сотень тисяч спрацьовувань на годину);
- відсутність електричних розрядів при комутації, що є важливим при використанні пускачів у середовищах з можливістю утворення вибухонебезпечних сумішей.

До недоліків безконтактних апаратів належать:

- відсутність гальванічної розв'язки в колі і видимого його розриву, що є важливим з погляду БЖД людини;
- висока чутливість до перенапруження і струмів вище номінальних, що може призводити до відмови апарата;
- вищі масогабаритні і вартісні параметри при порівнянних технічних характеристиках;
- великі енергетичні втрати, зумовлені значним спадом напруги на напівпровідниковому приладі у відкритому стані порівняно зі звичайними контактами.

Схему підключення тиристорів для керування струмом навантаження в однофазному ланцюзі змінного струму показано на рис. 9.11, епюри струму – на рис. 9.12.

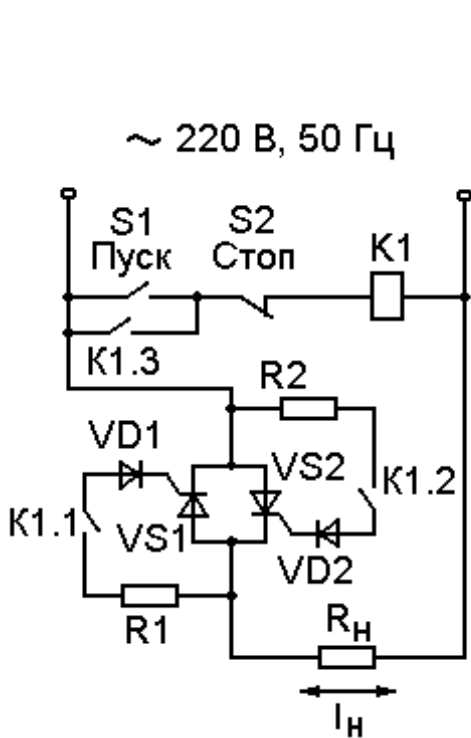


Рис. 9.11. Тиристорний однофазний контактор

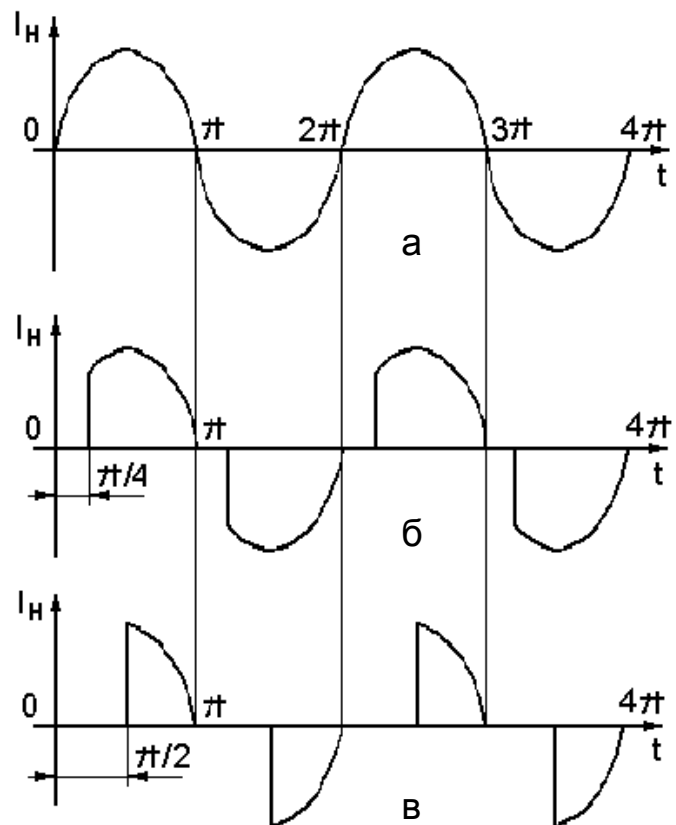


Рис. 9.12. Струм у ланцюзі навантаження при різних кутах відкриття тиристора

Вмикання тиристорного контактора відбувається при натисканні кнопки $S1$ «Пуск». При цьому спрацьовує реле $K1$ і своїми контактами $K1.1$ і $K1.2$ замикає ланцюг керування тиристорів $VS1$ і $VS2$. Одночасно відбувається самоблокування реле $K1$ контактами $K1.3$. У контакторі при замкнутих контактах $K1.1$ і $K1.2$ відкриватися буде той тиристор, на аноді якого починається збільшення позитивної півхвилі напруги. Оскільки зсув за часом між моментом вмикання тиристора і початком позитивної півхвилі практично дорівнює нулю, струм в активному навантаженні R_H буде за формою повторювати напругу мережі, що продемонстровано на рис. 9.12, а при $\varphi = 0$.

Вимкнення струму в навантаженні R_H відбувається при натисканні кнопки $S2$ «Стоп», що приводить до знеструмлення обмотки реле $K1$ і відповідно розмикання ланцюгів керування тиристорів нормально роз'єднаними контактами $K1.1$ і $K1.2$.

Збільшення кута вмикання тиристора при позитивній напрузі на його аноді приводить до зменшення середнього струму через навантаження. Форма струму через активне навантаження R_H при $\varphi = \pi/4$ і $\varphi = \pi/2$ показано на рис. 9.12, б, в. Таким чином, змінюючи кут відкриття тиристора φ від 0 до π , можна регулювати струм в навантаженні від максимального до нуля.

На рис. 9.13 зображено схему пристрою плавного пуску (ППП) трифазного асинхронного двигуна, що випускається фірмою «Інженерна Компанія" Технорос "».

Датчики струму ДТ1 і ДТ2 у силовому каналі ППП призначені для контролю, регулювання та вимірювання величини пускового або навантажувального струму електродвигуна, у тому числі для захисту від струмів перевантаження і короткого замикання.

Багатоканальне джерело живлення (ДЖ) перетворює мережну змінну напругу на систему напруг постійного струму необхідних рівнів і ступеня стабільності, гальванічно пов'язаних і не пов'язаних між собою, для живлення пристроїв керування.

Мікропроцесорний контролер (МК) здійснює формування режимів роботи ППП за допомогою сигналів керування тиристорами, сигналів захисту і аварійного відключення ППП, прийому і передачі зовнішніх керувальних, задавальних та інформаційних сигналів.

Пристрій введення-виведення (ПВВ) призначено для прийому і передачі зовнішніх керувальних сигналів. ПВВ має набір дискретних входів-виходів. У вхідні і вихідні ланцюги ПВВ включені пристрої гальванічної розв'язки для потенційного поділу з силовими і зовнішніми керувальними ланцюгами.

Формувачі імпульсів (ФІ), або драйвери, призначені для формування

необхідних рівнів керувальних сигналів тиристорів, гальванічного поділу силових ланцюгів і ланцюгів керування тиристорів і МК.

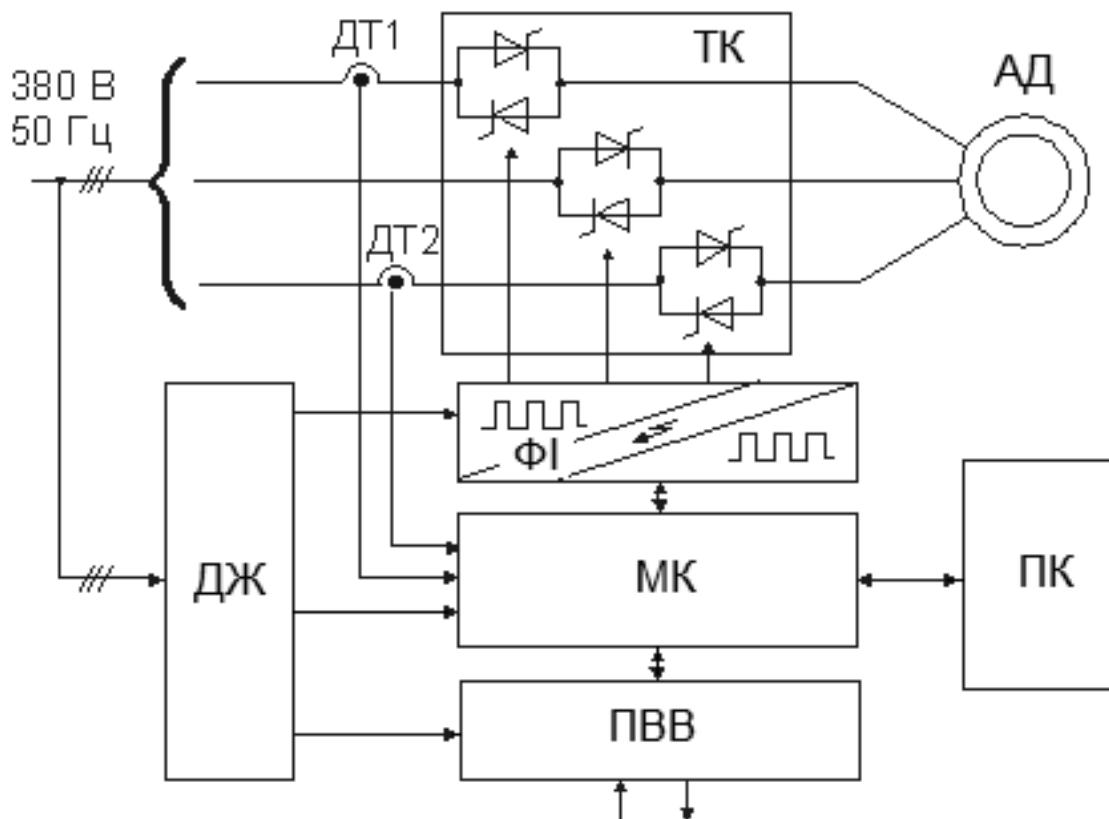


Рис. 9.13. Функціональна схема пристрою плавного пуску (ППП) трифазного асинхронного двигуна [36]: ТК – трифазний тиристорний комутатор; ДЖ – джерело живлення; ФІ – формувач імпульсів тиристорів; МК – мікропроцесорний контролер; ПВВ – пристрій введення-виведення; АД – привідний асинхронний двигун; ДТ1, ДТ2 – датчики струмів; ПК – пульт керування

У складі пристрою передбачено вбудований пульт керування (ПК), який містить клавіатуру для керування режимами роботи, задання та програмування параметрів, а також елементи індикації і сигналізації для відображення режимів, значень параметрів і діагностування.

У розглянутому ППП відсутня функція забезпечення зворотного обертання (реверса) двигуна. Для здійснення реверса електричного трифазного асинхронного двигуна необхідно виконати перекомутацію фаз (поміняти місцями дві фази) напруги живлення на статорних обмотках двигуна. Для цього у схему пускача підключають додаткові тиристорні ключі. Прикладом безконтактного тиристорного пускача з реверсуванням двигуна є тиристорний пускач (підсилювач) У-101, функціональну схему якого зображено на рис. 9.14.

Тиристорний пускач У-101 забезпечує реверсивне керування одно- і трифазними асинхронними електродвигунами потужністю до 1,1 кВт. Як силові комутувальні елементи у цьому пускачі використовуються тиристори VS1 – VS4, які відкриваються при надходженні на вхід пускача керувальної напруги.

Особливістю пускача У-101 є використання для комутації змінної напруги тиристорів, підключених у діагональ діодного містка, що утворює схему одного ключа. Пускач містить чотири тиристорних ключі, що забезпечують перемикання двох фаз силової напруги. Третя фаза не комутується і підключається до електричного двигуна ЕД через дросель Др2.

Керування тиристорами здійснюється за допомогою імпульсів, що формуються двома блокінг-генераторами БГ1 і БГ2, кожен з яких впливає на свою пару ключів. За відсутності керувального сигналу блокінг-генератори не формують імпульсів, всі ключі закриті і електродвигун знеструмлений.

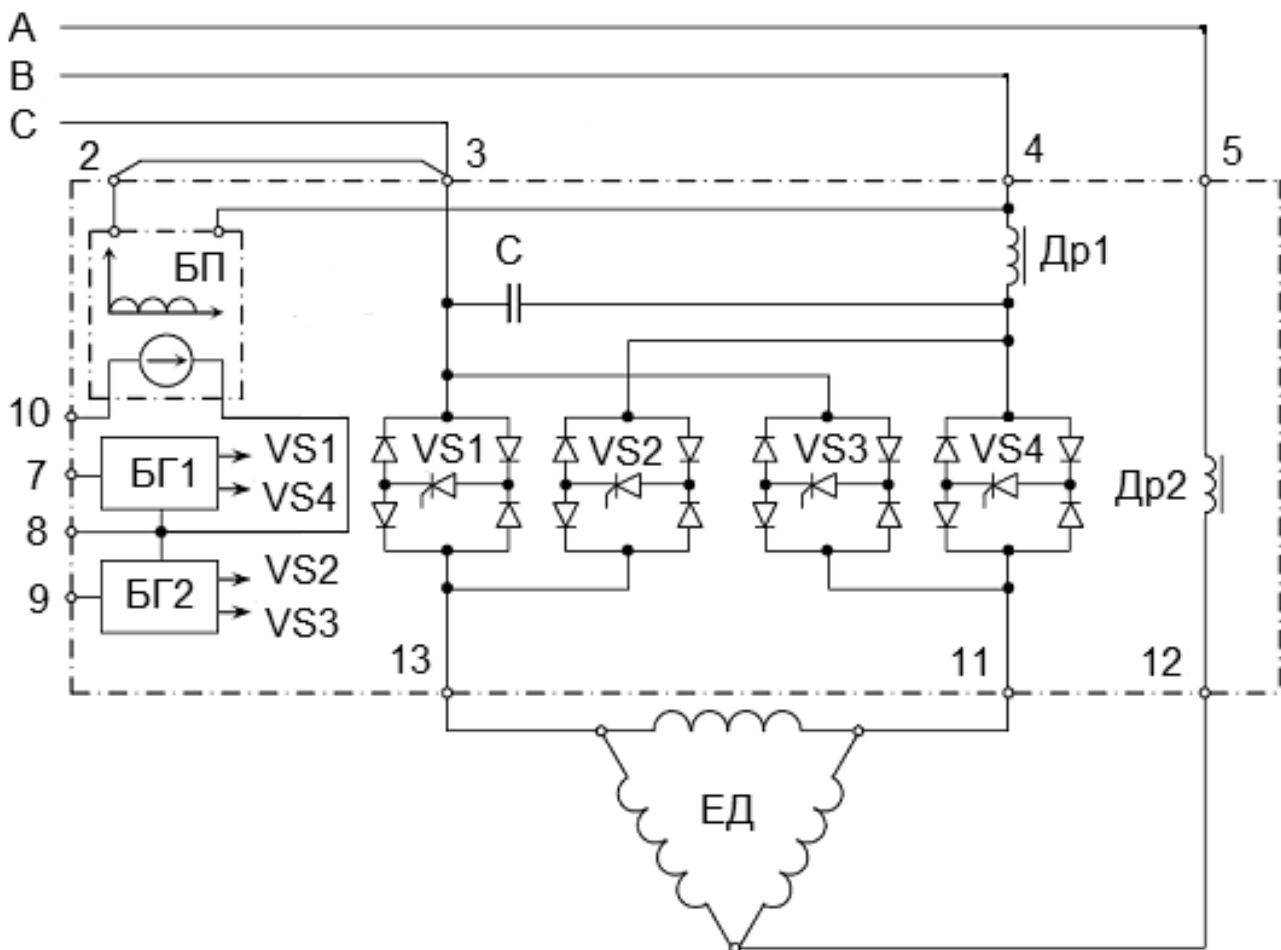


Рис. 9.14. Функціональна схема тиристорного пускача У-101:
 А, В, С – трифазна живильна мережа; БГ1, БГ2 – блокінг-генератори;
 ЕД – трифазний асинхронний електродвигун

Пускач У-101 є трипозиційним (вмикання, реверс, зупинка). Для вмикання двигуна на вхідні затискачі 7–8 або 8–9 (залежно від напрямку руху) подають напругу 24 В постійного струму (затискач 8 – «+»). При подачі напруги на затискачі 7–8 починає роботу блокінг-генератор БГ1, формуючи на виході поперемінні імпульси напруги тривалістю близько 60 мкс при частоті проходження близько 3 кГц. Імпульси надходять на керувальні електроди тиристорів VS1 і VS4, забезпечуючи їх відкриття і проходження струму по відповідних обмотках двигуна. При надходженні напруги 24 В на затискачі 9–8 спрацьовує блокінг-генератор БГ2, що вмикає тиристорні ключі VS2 і VS3. Це забезпечує реверсування послідовності фаз на електродвигуні ЕД.

При одночасній появі напруги 24 В на обох входах пускача блокінг-генератори залишаються замкненими завдяки спеціальному схемному рішенню вхідних ланцюгів пускача.

Через високу частоту керувальних імпульсів, що формуються блокінг-генераторами, відкриття тиристорів відбувається на самому початку кожного півперіоду напруги живлення мережі, що забезпечує максимальний струм у статорних обмотках двигуна.

При зникненні керувальної напруги на вході пускача припиняється генерація імпульсів у блокінг-генераторі, внаслідок чого на початку чергового півперіоду не відбувається повторного відкриття тиристорів і електродвигун вимикається.

Для ручного дистанційного керування електродвигуном у тиристорному пускачі передбачено вбудований блок живлення напругою 24 В. З'єднання виходу цього блока (клема 10) за допомогою дистанційного пульта з одним зі входів пускача (7 або 9) приводить до вмикання двигуна в потрібному напрямку.

Реактивні елементи, показані на схемі тиристорного пускача (див. рис. 9.14), призначені: дросель ДР1 і конденсатор С – для захисту тиристорів від перенапруг при раптових і різких спадах напруги; дросель Др2 – для обмеження швидкості збільшення напруги на силових електродах тиристорів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Гальперин, М. В. Практическая схемотехника в промышленной автоматике [Текст] / М. В. Гальперин. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 320 с.
2. Водовозов, А. М. Элементы систем автоматизации [Текст] : учеб. пособие / А. М. Водовозов. – М. : Академия, 2006. – 224 с.
3. Фрайден, Дж. Современные датчики [Текст] : справочник / Дж. Фрайден. – М. : Техносфера, 2005. – 592 с.
4. Джексон, Р. Г. Новейшие датчики [Текст] / Р. Г. Джексон. – М. : Техносфера, 2007. – 384 с.
5. Шандров, Б. В. Технические средства автоматизации [Текст] : учебник / Б. В. Шандров, А. Д. Чудаков. – М. : Изд. центр «Академия», 2007. – 368 с.
6. Кирюшин, О. В. Управление техническими системами [Текст] : курс лекций / О. В. Кирюшин. – Уфа : Изд-во УГНТУ, 2004. – 116 с.
7. Краснопрошина, А. А. Электрические элементы систем управления промышленными роботами [Текст]. В 11 кн. Кн.1 / А. А. Краснопрошина, В. А. Скаржепа, В. Б. Яковлев. – Киев : Вища шк., 1990. – 248 с.
8. Как правильно выбирать датчик положения [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Режим доступа : http://www.chipnews.ru/html.cgi/arhiv/99_06/stat_34.htm, свободный. – Загл. с экрана.
9. Кашуба, А. И. Измерения и автоматизация контроля в тепло- и газоснабжении [Текст] : учеб. пособие / А. И. Кашуба. – Харьков : САГА, 2009. – 264 с.
10. Датчики давления САФІР [Текст] : руководство по эксплуатации ИТЕК 406233.001 РЭ. – Харьков : СП «Манометр», 1999. – 57 с.
11. Кремлевский, П. П. Расходомеры и счетчики количества [Текст] : справочник / П. П. Кремлевский. – 4-е изд. – Л. : Машиностроение, 1989. – 701 с.
12. Борзенко, А. Технология MEMS [Электронный ресурс] / А. Борзенко // ВУТЕ. – 2006. – № 1 (89). – Электрон. дан. – Режим доступа : <http://www.bytemag.ru/articles/detail.php?ID=6756>, свободный. – Загл. с экрана.
13. Сысоев, Ю. А. Влияние разброса основных параметров на точностные характеристики генератора смесей газов [Текст] / Ю. А. Сысоев, Г. И. Костюк, А. Ю. Сысоев // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3(54). – Харьков, 2008. – С. 187–197.
14. Голуб, В. С. Применение датчиков давления фирмы Моторола [Текст] / В. С. Голуб // Электронные компоненты и системы. – 1997. – № 5 (10). – С. 1–7.

15. Ермолович, А. Фотоэлектрические преобразователи перемещений [Текст] / А. Ермолович // Электронные компоненты и системы. – 1997. – № 5 (10). – С. 8–12.
16. Корис, Р. Справочник инженера-схемотехника [Текст] / Р. Корис, Х. Шмидт-Вальтер. – М. : Техносфера, 2008. – 608 с.
17. Новиков, Ю. В. Основы цифровой схемотехники. Базовые элементы и схемы. Методы проектирования [Текст] / Ю. В. Новиков. – М. : Мир, 2001. – 329 с.
18. Топильский, В. Б. Схемотехника измерительных устройств [Текст] / В. Б. Топильский. – М. : БИНОМ, 2006. – 232 с.
19. Шевкопляс, Б. В. Микропроцессорные структуры. Инженерные решения [Текст] : справочник / Б. В. Шевкопляс. – 2-е изд. – М. : Радио и связь, 1990. – 512 с.
20. Зельдин, Е. А. Цифровые интегральные схемы в информационно-измерительной аппаратуре [Текст] / Е. А. Зельдин. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 280 с.
21. Популярные микросхемы ТТЛ серии КР 1533, КР 1531, К 531, К 555, К 155 [Электронный ресурс]. – Электрон. дан.. – Режим доступа : <http://www.twirpx.com/file/699956/>, условно свободный. – Загл. с экрана.
22. Лаврентьев, Б. Ф. Схемотехника электронных средств [Текст] : учеб. пособие / Б. Ф. Лаврентьев. – М. : Академия, 2010. – 336 с.
23. Федорков, Б. Г. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение [Текст] / Б. Г. Федорков, В. А. Телец. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
24. Цымбал, В. П. Теория информации и кодирование [Текст] : учебник / В. П. Цымбал. – 4-е изд., перераб. и доп. – Киев : Вища шк., 1992. – 263 с.
25. Иванов, Ю. И. Интерфейсы средств автоматизации [Текст] : учеб. пособие / Ю. И. Иванов, В. Я. Югай. – Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2005. – 252 с.
26. Наумкина, Л. Г. Цифровая схемотехника [Текст] : консп. лекций / Л. Г. Наумкина. – М. : Горная книга, 2008. – 308 с.
27. Кларк, Д. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи [Текст] : пер. с англ. / Д. Кларк, Д. Кейн. – М. : Радио и связь, 1987. – 300 с.
28. Денисенко, В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием [Текст] / В. В. Денисенко. – М. : Горячая линия-Телеком, 2009. – 608 с.
29. Кисаримов, Р. А. Практическая автоматика [Текст] / Р. А. Кисаримов. – М. : РадиоСофт, 2004. – 192 с.
30. Температурные измерения [Текст] : справочник / О. А. Геращенко [и др.]. – Киев : Наук. думка, 1989. – 704 с.

31. Харазов, В. Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами [Текст] / В. Г. Харазов. – СПб. : Профессия, 2009. – 592 с.
32. Шандров, Б. В. Технические средства автоматизации [Текст] : учебник / Б. В. Шандров, А. Д. Чудаков. – М. : Академия, 2007. – 368 с.
33. Лисицын, Б. Л. Отечественные приборы индикации и их зарубежные аналоги [Текст] : справочник / Б. Л. Лисицын. – М. : Радио и связь, 1993. – 432 с.
34. Самарин, А. В. Жидкокристаллические индикаторы. Схемотехника, конструкция и применение [Текст] / А. В. Самарин. – М. : СОЛОН-Р, 2002. – 304 с.
35. Игловский, И. Г. Справочник по слаботочным электрическим реле [Текст] / И. Г. Игловский, Г. В. Владимиров. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние. – 1984. – 584 с.
36. Раннев, Г. Г. Мощные электромагнитные реле : справочник инженера [Текст] / Г. Г. Раннев, В. А. Сурогица, В. И. Калашников ; под ред. Г. Г. Раннева. – СПб. : Профессия, 2001. – 152 с.
37. Полупроводниковые приборы: диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы [Текст] : справочник / А. В. Баюков [и др.] ; под общ. ред. Н. Н. Горюнова. – М. : Энергоиздат, 1982. – 744 с.
38. Устройство плавного пуска УПП [Текст] : техническое описание. – СПб. : Технорос, 2007. – 7 с.
39. Разработка и оформление конструкторской документации радиоэлектронной аппаратуры [Текст] : справочник / Э. Т. Романычева [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1989. – 488 с.
40. Скрипников, А. Cosmo: в борьбе за развивающийся рынок [Текст] : / А. Скрипников // Компоненты и технологии. – 2002. – № 1. – С. 36–38.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	3
ВСТУП.....	5
1. СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБ'ЄКТА	6
1.1. Основні положення.....	6
1.2. Структурна схема системи автоматизації технологічного об'єкта.....	8
2. ОТРИМАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ПРО ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ ЗА ДОПОМОГОЮ ДАТЧИКІВ	10
2.1. Загальні відомості про датчики. Основні їх характеристики.....	10
2.2. Класифікація датчиків	13
3. ДАТЧИКИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ	16
3.1. Потенціометричні датчики	16
3.2. Оптикоелектричні датчики переміщень	21
3.3. Кодові датчики переміщень	28
3.4. Рекомендації щодо вибору датчиків положення і переміщення	32
4. ДАТЧИКИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ.....	34
4.1. Загальні відомості.....	34
4.2. Перетворювачі тиску типу «Сапфір».....	35
4.3. Сучасні датчики для вимірювання тиску.....	39
4.3.1. Застосування технологій MEMS	39
4.3.2. Датчики тиску MPX фірми Motorola.....	40
4.3.3. Підвищення точності вимірювання тиску.....	45
4.4. Рекомендації щодо вибору датчиків тиску.....	47
5. ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ.....	48
5.1. Методи вимірювання температури	48
5.2. Термометри опору.....	49
5.3. Термоелектричні датчики (термопари).....	54
5.4. Термометри, основані на принципі розширення- стиснення речовини	57
5.5. Основні рекомендації щодо вибору датчиків температу- ри.....	60
6. ПРИСТРОЇ ЗВ'ЯЗКУ З ОБ'ЄКТАМИ.....	61
6.1. Підсилення (нормалізація) вихідних сигналів датчиків.....	62
6.2. Методи і пристрої аналого-цифрового і цифро-аналогового перетворень	67
6.2.1. Аналого-цифрові перетворювачі.....	67
6.2.2. Цифро-аналогові перетворювачі.....	70

7.	ПЕРЕДАЧА СИГНАЛІВ ПО ЛІНІЯХ ЗВ'ЯЗКУ І КОДУВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ	77
	7.1. Інтерфейс «струмова петля»	78
	7.2. Послідовні інтерфейси для передачі цифрових даних.....	79
	7.2.1. Інтерфейс RS-232	81
	7.2.2. Інтерфейс RS-485	85
	7.3. Гальванічна розв'язка засобів ПЗО	87
	7.4. Кодування цифрової інформації для передачі по послідовному каналу зв'язку.....	90
	7.5. Перешкодостійке кодування.....	96
	7.5.1. Коригувальний код Хеммінга	97
	7.5.2. Коригувальна здатність коду. Мінімальна кодова відстань	98
	7.5.3. Побудова коду Хеммінга	99
8.	ЕЛЕМЕНТИ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБ'ЄКТА	102
	8.1. Пристрої порівняння сигналів	102
	8.2. Задання контрольованого рівня технологічного параметра.....	106
	8.2.1. Пріоритетні шифратори.....	107
	8.3. Відображення інформації в системах керування.....	110
	8.3.1. Світлодіодні індикатори.....	110
	8.3.2. Семисегментні індикатори.....	112
	8.3.3. Матричні індикатори.....	115
	8.3.4. Рідкокристалічні індикатори.....	116
9.	ВИКОНАВЧІ ПРИСТРОЇ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ	116
	9.1. Загальні відомості.....	116
	9.2. Комутувальні пристрої.....	118
	9.2.1. Електромагнітні реле.....	118
	9.2.2. Рекомендації щодо вибору контактних реле.....	122
	9.2.3. Безконтактні комутувальні пристрої.....	122
	9.2.4. Тиристорні пускачі і контактори.....	125
	БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	131

Навчальне видання

Сисоєв Юрій Олександрович

**ЕЛЕМЕНТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ
РОБОТИЗОВАНИМ ВИРОБНИЦТВОМ**

Редактор Н. М. Сікульська

Зв. план, 2022

Підписано до друку 10.10.2022

Формат 60x84 1/16. Папір офс. Офс. друк

Ум. друк. арк. 7,6. Обл.-вид. арк. 8,5. Наклад 50 пр.

Замовлення 69. Ціна вільна

Видавець і виготовлювач

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

<http://www.khai.edu>

Видавничий центр «ХАІ»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

izdat@khai.edu

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001