

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

М.П. Благодарний, І.П. Внуков, Г.М. Тимонькін

ПРИСТРОЇ І МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Навчальний посібник

Харків «ХАІ» 2013

УДК 621.391:658.52.011.56(075.8)
Б68

Рецензенти: канд. техн. наук Б.В. Остроумов
канд. техн. наук А.П. Плахтєєв

Благодарний, М.П.

Б68 Пристрої і методи контролю технологічних процесів [Текст] : навч. посіб. / М.П. Благодарний, І.П. Внуков, Г.М. Тимонькін. — Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», 2013. — 180 с.

Наведено узагальнену структуру й інформаційні характеристики комп'ютерно-інтегрованих виробництв. Розглянуто засоби й методи контролю технологічних процесів, принципи будування, функціонування й характеристики датчиків для контролю багатьох технологічних процесів. Обґрунтовано шляхи реалізації методів контролю підсистем комп'ютерно-інтегрованих виробництв.

Для студентів, які навчаються за напрямом підготовки «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» спеціальності «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси та виробництва».

Іл. 97. Табл. 4. Бібліогр.: 28 назв

УДК 621.391:658.52.011.56(075.8)

- © Благодарний М.П., Внуков І.П., Тимонькін Г.М., 2013
- © Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2013

ВСТУП

Комплексна автоматизація сучасного виробництва на основі широкого використання багатоцільового технологічного обладнання з часовим програмним керуванням і виробничих роботів можлива шляхом створення комп'ютерно-інтегрованих виробництв (КІВ) з використанням керувальних обчислювальних комплексів для оптимального керування технологічними процесами. Комп'ютерно-інтегроване виробництво (КІВ) — це виробнича система (комора, лінія, ділянка, цех, завод), що реалізує комплексно-автоматизоване гнучке, оперативно перебудовуване, багатомономенклатурне виробництво. У загальному випадку КІВ складається з декількох підсистем технологічної, міжопераційної, технологічної підготовки виробництва й сервісу, тобто у КІВ інтегрується система автоматизованого проектування (САПР) виробів і технологій, автоматизовані системи керування технологічною підготовкою виробництва (АСК ТПВ), технологічними процесами (АСК ТП) і АСК підприємством (АСКП) [1—28].

Широке використання КІВ дає можливість швидко підвищувати продуктивність праці, упроваджувати прогресивні технології, забезпечувати гнучке й швидке перебудування виробництва на випуск нових видів виробів. Створення КІВ потребує комплексного підходу до вирішення багатьох складних завдань на всіх рівнях автоматизації виробництва. Будь-яке виробництво, у тому числі й КІВ, містить множини підсистем, що пов'язані між собою [9, 11—16]. Для безперебійного й чіткого функціонування КІВ необхідно керувати ним, застосовуючи достовірну інформацію щодо параметрів широкої номенклатури технологічних процесів, які відбуваються в підсистемах, технічного стану всіх підсистем КІВ та зв'язків між ними [11].

Цілком слушним є висновок про те, що високі технічні характеристики СКК КІВ, насамперед функціональність і надійність, безпосередньо впливають на ступінь досконалості об'єктів, до яких вони належать. Забезпечення високої надійності аналогових і цифрових вузлів підсистем КІВ, насамперед безвідмовності, ремонтпридатності й готовності до застосування за призначенням, є неможливим без розвинутих засобів контролю й діагностування їх технічного стану й відновлення (замінення) компонентів, що відмовили, а також процесу функціонування.

Цей висновок є правильним як для систем, що відновлюються автоматично, так і для систем, працездатність яких відновлюється шляхом ремонту. У першому випадку йдеться про відмовостійкість систем із структурною або іншими видами надмірності, у яких засоби контролю й діагностування є складовою вбудованої підсистеми, що забезпечує визначення моменту втрати працездатності, локалізацію причини відмови, реконфігурацію структури шляхом перекомутації зв'язків між елементами та відновлення інформації для продовження функціонування [10, 15, 17]. Такі системи застосовуються в критичних сферах, де необхідно обробляти інформацію у реальному масштабі часу (бортові системи, системи

керування безперервними технологічними процесами, небезпечними об'єктами та ін.). Для таких систем важливими характеристиками є висока достовірність, оперативність і безвідмовність засобів контролю й діагностування. Якщо відновлення працездатності здійснюється з участю обслугового персоналу, то швидкодія засобів контролю й точність, з якою визначаються причини відмов, безпосередньо впливають на готовність системи, її економічну ефективність. Це стосується систем виробничого й експлуатаційного контролю відновлюваних об'єктів. Відомо, що вартість виявлення й усунення несправностей збільшується при переході від попередніх етапів життєвого циклу (задум, проектування) до наступних (виробництво, застосування за призначенням) [27–30].

Таким чином, досконалість засобів контролю й діагностування є важливою характеристикою вузлів КІВ, значення якої зростає внаслідок ускладнення їхніх елементних баз, структур і характеристик технологічних процесів, що виконуються.

Посібник систематизує великий обсяг матеріалу з методів і засобів контролю елементів і вузлів (підсистем) КІВ. Використання широкої номенклатури типових апаратно-програмних вузлів для синтезу й модернізації КІВ дає студентами змогу опанувати методи контролю технічного стану, оперативного пошуку місць відмов і вибору адекватних методів і засобів контролю й діагностування.

Матеріал посібника підготовлено колективом авторів. Розділи 1–3 підготовлено до друку заслуженим винахідником України професором Г.М. Тимонькіним, розділи 4–5 і загальне редагування посібника — заслуженим винахідником України доцентом М.П. Благодарним, а розділи 6–8 — заслуженим працівником освіти України професором І.П. Внуковим.

Частина 1. ПРИСТРОЇ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

1. КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ВИРОБНИЦТВА ТА ЇХНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

1.1. Узагальнена структура комп'ютерно-інтегрованого виробництва

Функції, що виконуються комп'ютерно-інтегрованими виробництвами (КІВ), поділяються на інформаційні, які реалізуються підсистемою керування, і виробничі. Інформація щодо процесів оброблення, складання, технічного стану елементів виробництва й результатів технологічного процесу (виготовленої продукції) надходить до суміжних керувальних ланок, обслугового персоналу, підсистем сервісу, технологічної підготовки виробництва й т. ін. На основі отриманої інформації приймається рішення щодо подальшої роботи підсистем КІВ [1, 11, 13, 34].

Як підсистема керування КІВ і робототехнічних систем використовується керувальний обчислювальний комплекс (КОК), який створюється зазвичай на базі комп'ютерів і містить прилади з'єднання з об'єктом, периферійні прилади, засоби передачі інформації. Керувальний обчислювальний комплекс має ієрархічну структуру (рис. 1.1), що містить зазвичай три рівні, кожному з яких відповідає свій комплекс технічних засобів і вирішуваних завдань [5, 6, 13, 29, 34]. Керування роботою КОК, обмін інформацією між рівнями і зв'язок із зовнішніми вищими рівнями забезпечується сукупністю обслуговувальних програм.

На першому рівні КОК здійснює керування окремими об'єктами виконувальної системи КІВ. До складу КОК належить мікроЕОМ, що керує модулями обробки (складання) (відповідно МО і МС), модулями робототехніки (МР), транспортною системою (ТС) та автоматизованим складом (АС) через пристрої зв'язку з об'єктом (ПЗО). На цьому рівні здійснюється зазвичай автоматичне внутрішньомодульне керування технологічними процесами з оптимізацією режимів, яке реалізується на базі мікроЕОМ і мікропроцесорних наборів (МПН).

На другому рівні виконуються завдання автоматизації організаційно-технологічного керування й синхронізації роботи МО, що реалізується на базі термінальних станцій оброблення інформації на основі центральної ЕОМ.

Третій рівень керування являє собою автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУ ТП), виробництвом (АСУВ) і системою автоматизованого проектування (САПР). Його призначено для автоматизації оперативно-виробничого керування стосовно задач тижневого й змінно-добового планування, технологічного проектування, обліку й сервісу. МініЕОМ відповідних автоматизованих систем зв'язані з центральною ЕОМ другого рівня [34].

Нормальне функціонування засобів оброблення усіх рівнів КОК забезпечується завдяки обміну інформацією між з'єднаними комп'ютерами. Обмін інформацією між комп'ютерами й об'єктами, якими вони керують, є необхідною закономірністю функціонування КІВ.

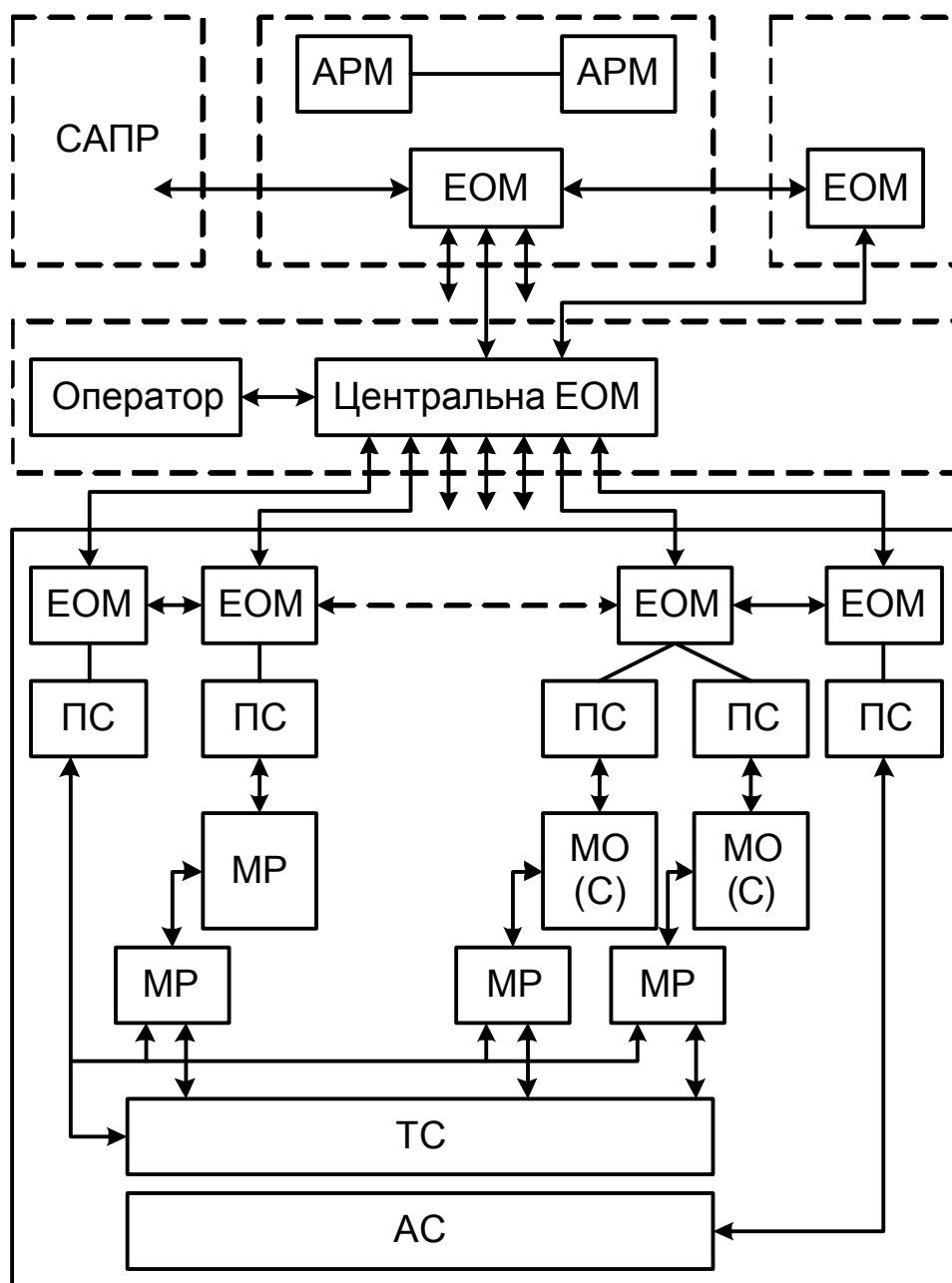


Рис. 1.1. Структура комп'ютерно-інтегрованого виробництва

При обміні інформацією залежно від напрямку передачі кожен з об'єктів (у тому числі й комп'ютер) може бути або джерелом, або отримувачем інформації.

Відомості, які треба передати від джерела (відправника) до отримувача, називають повідомленнями [5, 14, 28]. Повідомлення можуть існувати в аналоговій або знаковій формі.

Аналогову форму має повідомлення, що подається якою-небудь

фізичною величиною, наприклад струмом, тиском, температурою; знакову форму — повідомлення, що подаються окремим знаком або їх сукупністю. Повідомлення в аналоговій формі можуть бути неперервними, неперервно-дискретними, дискретно-неперервними та дискретними аналоговими, а в знаковій формі — тільки дискретними знаковими (через дискретну природу самих знаків) [33, 34].

Комп'ютерно-інтегроване виробництво в загальному випадку містить технологічне устаткування, засоби керування й зв'язку, перевірне устаткування, енергосистеми та інші механічні, електричні, електронні пристрої й засоби, які є взаємозв'язаними й утворюють певну цілісність і єдність. Цей комплекс є автоматизованим.

Для спрощення комп'ютерно-інтегроване виробництво будемо називати об'єктом, що експлуатується (**ОЕ**). Поділимо його умовно на дві взаємозв'язані частини (рис. 1.2) [5, 11]:

- об'єкт контролю й керування (**ОКК**);
- засоби контролю й керування (**ЗКК**).

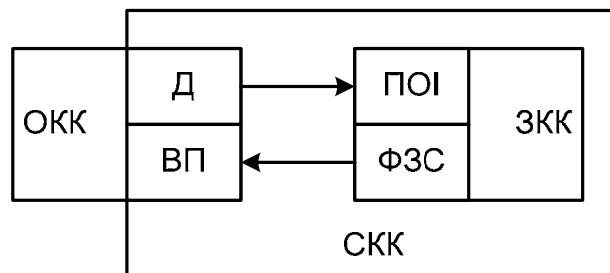


Рис. 1.2. Узагальнена схема КІВ

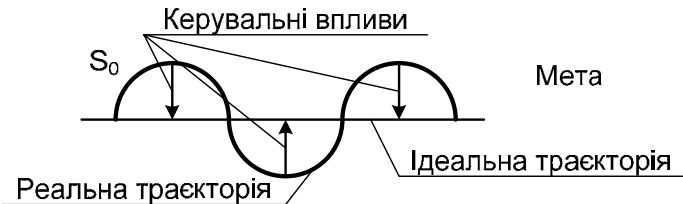
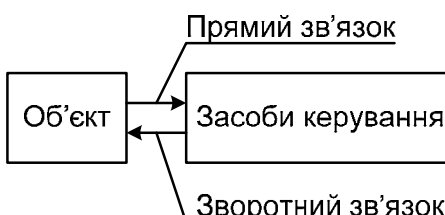
На об'єкті контролю й керування поміж систем, підсистем, вузлів і пристроїв виділимо датчики (**Д**) і виконавчі пристрої (**ВП**). Датчики, виконавчі пристрої, засоби контролю й керування, допоміжні пристрої, що зв'язують їх у єдине ціле, утворюють систему контролю й керування. Об'єкт контролю й керування характеризується своїм станом, який можна визначити датчиками.

Повідомлення щодо стану об'єкта надходять до засобів контролю й керування (**ЗКК**), де оброблюються пристроєм оброблення інформації (**ПОІ**) відповідно до заданого закону.

Засоби контролю й керування (**ЗКК**) формують зворотний сигнал (керувальний або стимулювальний), який з допомогою формувача зворотних сигналів (**ФЗС**) передається на об'єкт контролю й керування. Далі більш детально буде розглянуто поняття «керування» і пов'язані з ним «закон керування», «алгоритм керування» та ін. (табл. 1.1).

Об'єкт функціонує в зовнішньому середовищі, прямуючи до досягнення мети (або заданого стану). Завади зовнішнього середовища протидіють досягненню заданої мети (або заданого стану). Тому засоби керування мають компенсувати вплив середовища, що заважає.

Таблиця 1.1

Загальні закони керування	Зміст загальних законів керування
Усяке керування є цілеспрямованим процесом	
Усяке керування є інформаційним процесом	<p>Зберігання бажаних станів (ідеальної траєкторії). Збір і передача інформації про поточний стан об'єкта. Оцінювання поточного стану: порівняння поточного стану з бажаним. Вироблення (формування) керувального впливу. Передача керувального впливу. Виконання керувального впливу</p>
Усяке керування здійснюється в замкнутому контурі	<p>Середовище</p> 

Керування — це цілеспрямований вплив на об'єкт керування, який компенсує вплив зовнішнього середовища і приводить його робочі процеси до необхідного стану (або заданої мети). Цілеспрямований вплив на об'єкт керування можна здійснити у таких випадках:

- а) зібрано відомості щодо поточного стану об'єкта;
- б) проведено порівняльне оцінювання поточного й бажаного (що відповідає меті) станів;
- в) сформовано керувальний вплив;
- г) передано керувальний вплив;
- д) прийнято й виконано керувальний вплив.

Пункти г) і д) можна виконати, якщо об'єкт і засоби керування являють собою замкнутий контур.

Таким чином, керування об'єктом є цілеспрямованим інформаційним процесом у замкнутому контурі (об'єкт — засоби керування) з усунення впливу зовнішнього середовища. З огляду на принцип причинності кожному зовнішньому впливу (дії) на об'єкт має відповідати певна реакція засобів керування (керувальна дія).

Конкретна керувальна дія формується за законами керування певним об'єктом. Закон керування — це конкретне правило формування керувальної дії (сигналу) на основі відомих станів заданого об'єкта. Алгоритм керування — це кінцевий набір формалізованих правил

формування керувальних дій.

Поняття «закон керування» і «алгоритм керування» змістовно є дуже схожими. Будь-який алгоритм (на відміну від закону) має характерні особливості:

- масовість — можливість розв'язання однотипних задач на заданій множині вхідних даних;

- детермінованість — розкладення розрахунків на елементарні операції зазвичай дискретного характеру;

- результативність — однозначна відповідність отримуваних результатів вхідним даним.

Цілей керування можна досягти за наявності вірогідних вихідних і поточних даних про стан об'єкта керування. Ці відомості можна отримати під час контролю об'єкта.

Якщо в системі здійснюються процеси контролю й керування, то таку систему називають системою контролю й керування. Зі змісту понять «керування», «контроль», «дія», «алгоритм» та інших випливає, що будь-яка система, що реально існує, містить [5]:

- матеріали, з яких побудовано систему;

- енергію для отримання й оброблення відомостей, формування й виконання керувальних (стимулювальних) дій;

- відомості щодо стану об'єкта, закони й алгоритми керування й контролю, норми (допуски, установлені вимоги).

Поняття «матеріал» («речовина»), «енергія» є широко відомими. Унаслідок існування законів збереження речовини й енергії поняття «речовина» й «енергія» пов'язують разом усі явища природи. Відомості, повідомлення, інформація дають можливість з єдиного погляду розглядати процеси взаємодії об'єктів і засобів різної фізичної природи й різного призначення.

Інформація — одна із властивостей предметів, явищ, об'єктів, систем, процесів об'єктивної дійсності, що містить усі відомості про неї, які можна зберігати, передавати, приймати й перетворювати. Під інформацією розуміють не самі предмети, явища, об'єкти, системи, процеси, а відомості про них у вигляді чисел, формул, описів, креслень, символів, образів, тексту, мовлення, показань приладів, стимулювальних дій, команд керування (керувальних дій) і т. ін. Наприклад, інформація — це зміст книги, підручника, картини; найрізноманітніші стани об'єкта контролю й керування. Далі внутрішню інформацію про об'єкт будемо називати інформацією джерела (ІД).

Уся інформація або її частина може передаватися. Інформація, яка передається, має назву повідомлення. Частина повідомлення, яку прийнято іншим об'єктом (адресатом), називають зовнішньою інформацією (або власне інформацією).

Зовнішня інформація виявляється під час обміну відомостей між об'єктами. Зв'язок між повідомленнями, інформацією й сигналами

показано на рис. 1.3.

При цьому один і той самий об'єкт (суб'єкт) може бути як джерелом, так і отримувачем (адресатом) інформації за наявності двостороннього зв'язку між ними. Зберігання, генерація, передача, перетворення й приймання інформації здійснюється сигналами, тобто матеріальним носієм інформації є сигнал.

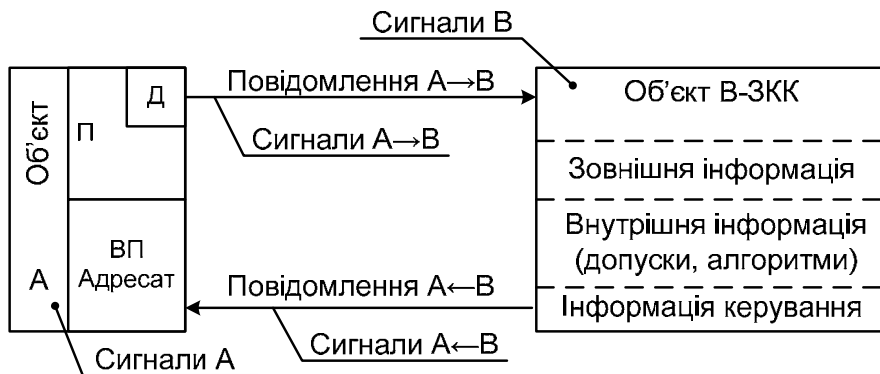


Рис. 1.3. Зв'язок між відомостями, повідомленнями, інформацією та сигналами

Сигналом може бути або фізичний процес зі змінюваними параметрами, або речовина, стан якої точно відповідає відомостям щодо джерела інформації або змісту повідомлення, яке передається.

1.2. Загальні відомості про технологічні процеси

Процес (від лат. processus – просування) – послідовне змінення явищ, станів в розвитку чого-небудь, сукупність послідовних дій для досягнення якого-небудь результату [1]. *Технологія* (від гр. techné – мистецтво, майстерність, уміння та λόγος – вчення) – сукупність методів оброблення, виготовлення, змінення стану, властивостей, форми сировини, матеріалу або напівфабрикату, що здійснюються під час виробництва продукції [1, 9].

Технологічний процес (скорочено техпроцес) – це впорядкована послідовність взаємозв'язаних дій, що виконуються з моменту виникнення початкових даних до отримання необхідного результату. Технологічний процес є частиною виробничого процесу, що містить цілеспрямовані дії зі змінення і (або) визначення стану предмета праці. До предметів праці відносять вузли й вироби [9]. Майже будь-який технологічний процес можна розглядати як частину складнішого процесу і сукупність менш складних (елементарних) технологічних процесів.

Елементарним технологічним процесом, або технологічною операцією, називають найменшу частину технологічного процесу, що має усі його властивості, тобто це такий ТП, подальша декомпозиція якого призводить

до втрати ознак, які є характерними для методу, покладеного в основу цієї технології. Зазвичай кожна технологічна операція виконується на одному робочому місці не більше, ніж одним робітником. Прикладами технологічних операцій можуть бути введення даних з допомогою сканера штрих-кодів, роздрук звіту, виконання SQL-запиту до бази даних і т. ін.

Технологічні процеси складаються з технологічних (робочих) операцій, які, у свою чергу, складаються з технологічних переходів. Технологічним переходом називають закінчену частину технологічної операції, що виконується одними й тими самими засобами технологічного оснащення. Допоміжним переходом називають закінчену частину технологічної операції, що складається з дій людини і (або) устаткування, які не супроводжуються зміненням властивостей предметів праці, але потрібні для виконання технологічного переходу. Для здійснення технологічного процесу потрібне застосування сукупності знарядь виробництва – технологічного устаткування, що називають засобами технологічного оснащення.

Залежно від застосування різних операцій і устаткування у виробничому процесі для вирішення одного й того ж завдання розрізняють такі види технологічних процесів [9, 13]:

- одиничний технологічний процес (ОТП), що розробляється індивідуально для конкретної деталі;

- типовий технологічний процес (ТТП), який створюється для групи виробів, що мають спільність конструктивних ознак; розроблення типових технологічних процесів здійснюють на загальнодержавному й галузевому рівнях, а також на рівнях підприємства відповідно до загальних правил розроблення технологічних процесів;

- груповий технологічний процес (ГТП).

У промисловості й сільському господарстві технологічний процес описується в документах, що мають назву операційних карт технологічного процесу (при детальному описі) або маршрутних карт (при короткому описі):

- маршрутна карта – опис маршрутів руху деталі, що виготовляється, по цеху;

- операційна карта – перелік переходів, установок і інструментів, що застосовуються;

- технологічна карта – документ, у якому описано процес оброблення деталей, матеріалів, конструкторська документація, технологічне оснащення.

Технологічний процес – частина виробничого процесу, що містить дії зі змінення й подальшого визначення стану предмета виробництва. Технологічними процесами є сукупність механічних, фізичних, хімічних процесів – операцій, що змінюють форму і розміри деталей, їхні властивості, зовнішній вигляд.

Технологічний процес може містити також з'єднання (складання)

деталей в складальні одиниці і готовий виріб, перевірку відповідності готового виробу кресленню і технічним умовам. Технологічний процес здійснюється на основі технологічних і маршрутних карт, що належать до складу технологічної документації. Для певних типів виробів розроблено типовий або груповий ТП, що спрощує роботу з підготовки виробництва, покращує систему організації виробництва, а також дає змогу в умовах одиничного й серійного виробництва підвищити продуктивність праці шляхом застосування прогресивних методів оброблення й організації праці, що є властивими потоково-масовому виробництву.

Технологічний процес у загальному випадку реалізується складною системою СС(ТП), яка описується такою логічною умовою [13]:

$$CC(ТП) = M \cap I \cap R \cap P \cap S, \quad (1.1)$$

де **СС(ТП)** – умовне позначення складної системи, яка реалізує технологічний процес;

М – багатофункціональність застосування;

I – ієрархічність структури;

R – будовання й функціонування підсистем (трактів, блоків і т. ін.) на різних фізичних принципах;

P – перевага функціонального резервування над конструктивним;

S – наявність прямих, зворотних і перехресних зв'язків між підсистемами (трактами, блоками і т. ін.).

Технологічні процеси поділяють на типові й перспективні [9, 13, 34].

Типовий технологічний процес характеризується єдністю змісту й послідовністю більшості технологічних операцій і переходів для групи виробів із загальними конструкторськими принципами.

При застосуванні перспективного технологічного процесу припускається випередження прогресивного світового рівня розвитку технології виробництва або відповідність йому.

Керування проектуванням технологічного процесу здійснюється на основі маршрутних і операційних технологічних процесів.

Маршрутний технологічний процес оформляється маршрутною картою, де встановлюється перелік і послідовність технологічних операцій, тип устаткування, на якому ці операції виконуватимуться, застосовуване оснащення, збільшена норма часу без зазначення переходів і режимів обробки.

В операційному технологічному процесі деталізується технологія оброблення й складання.

Технологічний процес (наприклад, процес оброблення даних) можна поділити на більші етапи.

Початковий або первинний – збір початкових даних, їх реєстрація (приймання первинних документів, перевірка повноти і якості їх заповнення тощо). За способами здійснення збору й реєстрації даних

розрізняють такі види ТП: механізований – збір і реєстрація інформації здійснюється безпосередньо людиною з використанням простих приладів (ваги, лічильники, мірна тара, прилади обліку часу і т. ін.); автоматизований – використання документів, що читає машина, реєструвальних автоматів, систем збору і реєстрації інформації, операцій формування первинних документів та отримання машинних носіїв, що забезпечують їх поєднання; автоматичний – використовується в основному при обробленні даних в режимі реального часу (інформація з датчиків, що враховують хід виробництва – випуск продукції, витрати сировини, простої устаткування, – надходить безпосередньо до комп'ютера).

Підготовчий – приймання, контроль, реєстрація вхідної інформації і перенесення її на машинний носій. Розрізняють візуальний і програмний контроль, що дає змогу відслідковувати інформацію щодо повноти введення, порушення структури початкових даних, помилки кодування. При виявленні помилки робиться виправлення даних, що вводяться, коригування і повторне введення;

Основний – безпосереднє оброблення інформації. Заздалегідь може бути виконано службові операції, наприклад сортування даних.

Завершальний – контроль, випуск і передача результатної інформації, її розмноження й зберігання.

Контроль – процес розпізнання одного з двох визначених відповідно до нормативно-технічної документації (НТД) класів технічних станів об'єкта (процесу), що діагностується [12]. Часто під час контролю здійснюється розпізнання працездатного $ТС_p$ і непрацездатного $ТС_n$ станів.

Діагностування – процес розпізнання технічного стану із заданим ступенем деталізації (рис. 1.4).

Усі стани системи поділяються на три множини станів [15–17, 20]:

$S_{ппс}$ – множина повністю працездатних станів об'єкта;

$S_{чпс}$ – множина частково працездатних станів об'єкта;

$S_{нпс}$ – множина непрацездатних станів об'єкта.

Справний стан ($S_{сс}$) – це такий стан системи, при якому її основні й другорядні параметри відповідають усім вимогам нормативно-технічної документації (НТД) і, крім того, не мають дефектів у резервних засобах (у резервних вузлах, агрегатах). Звідси випливає, що справна система може виконувати задані функції в усіх режимах роботи.

Працездатний стан ($S_{ппс}$) – це такий стан системи, при якому її основні параметри знаходяться у межах, установлених НТД. При цьому другорядні параметри можуть бути або в межах норм, або поза ними.

Несправний стан – це такий стан системи, при якому хоча б один параметр не відповідає вимогам НТД. Звідси випливає, що несправна система може бути працездатною, якщо вимогам НТД відповідають основні параметри і не відповідає хоча б один другорядний параметр.

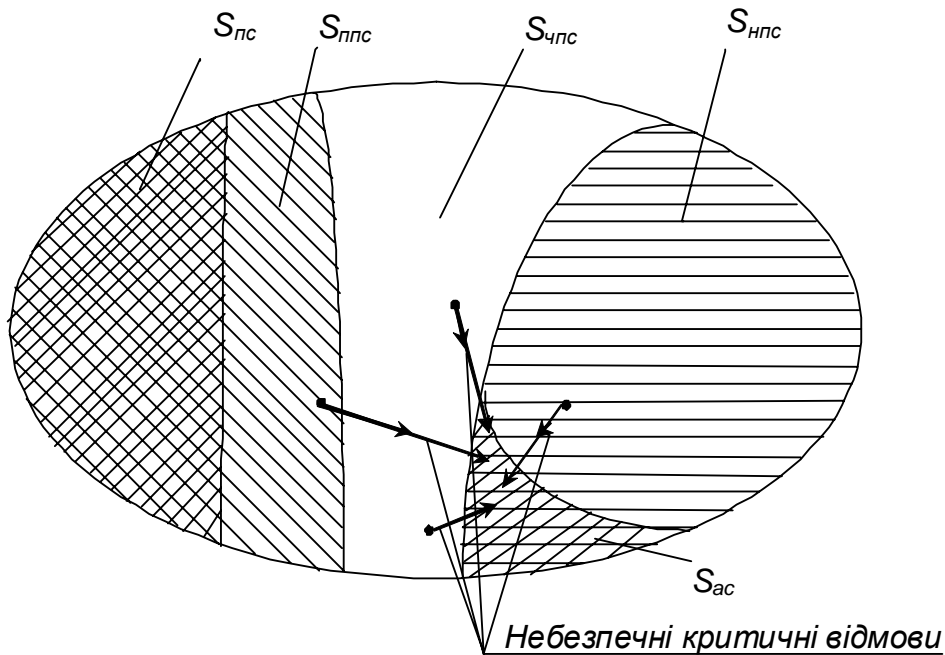


Рис. 1.4. Стани системи

Несправна система може бути й непрацездатною, якщо вимогам не відповідає хоча б один основний параметр, а другорядні параметри можуть як відповідати, так і не відповідати вимогам НТД.

Часто під час контролю апаратури визначається частково справна апаратура, яка відповідає частково працездатним станам системи ($S_{чпс}$). Це означає, що система може виконувати функції в деяких режимах (основних і допоміжних), при цьому деякі параметри відповідають вимогам НТД.

Відмовою називають подію, яка полягає в утраті системою працездатності. У цьому випадку хоча б один із основних параметрів не відповідає виставленому допуску.

З основних параметрів системи виділимо такі, невідповідність яких вимогам НТД призводить до аварійних станів системи ($S_{ас}$). У множинах повністю працездатних станів ($S_{ппс}$) виділимо підмножину справних станів $S_{сс}(S_{сс} \subseteq S_{ппс})$, а у множині непрацездатних станів ($S_{нпс}$) виділимо підмножину аварійних станів $S_{ас}(S_{ас} \subseteq S_{нпс})$. Розрізняють також процес пошуку дефектів, який являє собою розпізнання однієї із множин $TC_{\bar{И}}$ завчасно запроваджених класів несправних станів $TC_{1\bar{И}}, TC_{2\bar{И}}, \dots, TC_{N\bar{И}}$,

причому $TC_{\bar{И}} = \bigcup_{i=1}^N TC_{i\bar{И}}$, $TC_p \subseteq TC_{\bar{И}}$, де N – кількість станів.

Відомості щодо операцій контролю об'єктів (технологічних процесів) показано на рис. 1.5, де S_i , $i = 1, \dots, 5$ – стани (справний, працездатний, частково працездатний, непрацездатний, аварійний).

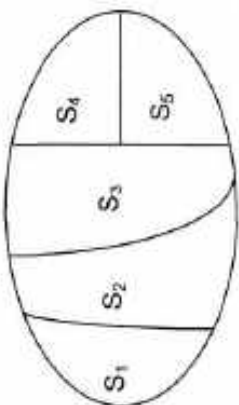
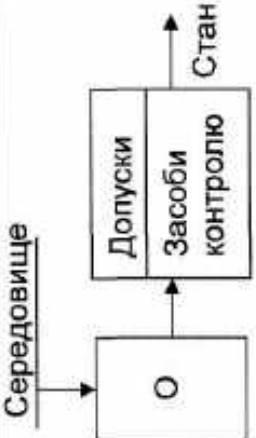
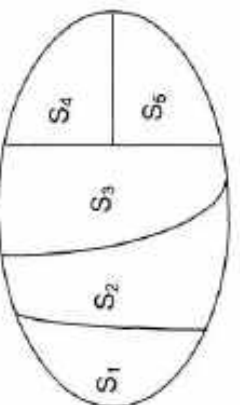
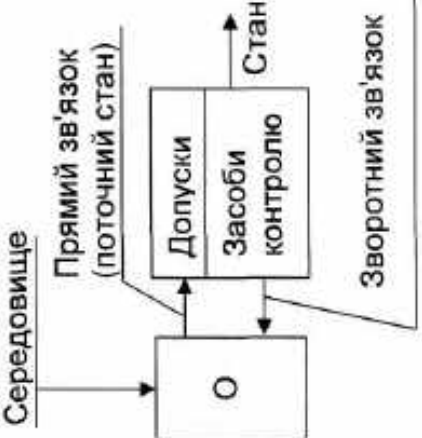
Загальні закони контролю об'єкта			
Схема контролю	Усякий контроль – цілеспрямований процес	Усякий контроль – інформаційний процес	Контроль може здійснюватися за розімкнутою (пасивною) або замкнутою (активною) схемою
Пасивна	$s_i = ? , i = \overline{1,5}$ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Визначення і зберігання норм (допусків, установлених вимог) стану об'єкта. 2. Збирання інформації про поточний стан об'єкта. 3. Порівняльна оцінка поточного стану з нормою (допуском). 	<p>Середовище</p> 
Активна	$s_i = ? , i = \overline{1,5}$ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Визначення і зберігання норм (допусків, установлених вимог) стану об'єкта. 2. Збирання інформації про поточний стан об'єкта 3. Порівняльна оцінка поточного стану з нормою (допуском). 4. Формування стимулювального впливу на об'єкт. 5. Передача стимулювального впливу на об'єкт. 6. Виконання стимулювального впливу на об'єкті. 	<p>Середовище</p> 

Рис. 1.5. Склад і зміст контролю

Інтегральним показником якості таких систем може бути ефективність функціонування [13], що визначається мірою їх пристосованості до виконання необхідних функцій з урахуванням економічної доцільності. Водночас ефективність функціонування складних систем істотною мірою залежить від того, наскільки правильно вибрано методи їх контролю, а також враховано можливості автоматичних засобів і людини-оператора при реалізації цих методів. Ефективність також значною мірою залежить від правильності вибору сукупності ознак і критеріїв, що характеризують стан складних систем як в статичній, так і в динамічній, а також від того, наскільки раціонально побудовано структуру самих автоматизованих засобів контролю (АЗК).

Перед початком проектування АЗК необхідно у кожному конкретному випадку визначити їхні функції, значення і місце в керуванні функціонуванням великої системи як багатоцільової системи. Така система повинна мати ієрархічну структуру побудови, окремі ланки якої можна реалізовувати за різними фізичними принципами.

На початковому етапі проектування потрібна чітка класифікація методів і видів контролю з урахуванням можливості й доцільності їх використання за умови контролю функціонування складної системи. На цьому ж етапі має бути забезпечено змістовний опис процесів контролю й здійснено їх формалізацію з урахуванням вибраних методів контролю й синтезованих для цієї великої системи функцій працездатності [13].

Ефективність вирішення перелічених завдань значною мірою визначається тим, наскільки повно проведено аналіз масивів і потоків інформації, яка характеризує стан СС(ТП). З урахуванням того, що складні системи будуються з різних за своєю природою підсистем, до яких належать і колективи людей, такий аналіз є дуже трудомістким і охоплює одночасно проблеми збору, розподілу й перероблення значних масивів інформації. При цьому перш за все аналізуються властивості потоків інформації, яка надходить до АЗК від об'єктів контролю; правила оптимального формування вхідних інформаційних потоків, які визначаються ієрархічністю структури СС (ТП); особливості передання інформації від об'єктів контрольованої СС (ТП) до АЗК і захист її від спотворень.

Після всебічного аналізу вхідних інформаційних потоків встановлюють оптимальний перелік контрольованих параметрів, вибирають їхні номінальні й граничні значення, формулюють умови їх виміру й оброблення.

Спираючись на дані, які отримано під час аналізування СС (технологічних процесів) як об'єктів контролю й особливостей інформаційних потоків, що характеризують їхній стан, можна вибрати оптимальну сукупність методів контролю і розробити раціональні циклограми роботи АЗК з використанням цих методів.

Оскільки в контурах керування і каналах збору, передання й оброблення інформації СС (ТП) разом з людиною-оператором особливе

місце посідають комп'ютери й засоби автоматики, бажано максимально використовувати їхні логічні й обчислювальні можливості для організації процесів контролю.

При цьому особливу увагу слід приділяти оптимальному поєднанню апаратних і програмних методів контролю, урахувувати економічну доцільність їх практичної реалізації в умовах конкретної СС (ТП). Слід прагнути до використання мінімальної кількості методів контролю при максимальному охопленні контрольованого устаткування та, якщо це можливо, уникати застосування специфічних методів, придатних лише для вузького класу вузлів, блоків і підсистем.

Остаточному вибору сукупності методів контролю має передувати глибокий системотехнічний аналіз їхніх переваг і недоліків в конкретних умовах експлуатації складної системи. Тільки після такого аналізу доцільно розпочинати розроблення структури автоматизованих систем контролю (АСК), розглядати питання забезпечення відповідності АСК умовам її функціонування, формулювати принципи об'єднання функціональних засобів пульта оператора АСК із системою передання даних і, нарешті, оптимізувати характеристики АСК за критерієм економічної ефективності.

На всіх етапах створення засобів контролю технологічних процесів (функціонування конкретної складної системи) у центрі уваги мають бути їхні основні експлуатаційні якості, такі, як надійність, достовірність результатів контролю і готовність до застосування з урахуванням надійності людини-оператора.

Ще на стадії розроблення ескізного проекту необхідно проаналізувати питання раціональної організації процесу експлуатації АСК, прогнозування й кількісного визначення її готовності до застосування, вибору критеріїв якості АСК. На кінцевому етапі створення АСК слід розробити рекомендації щодо оцінювання ефективності її роботи залежно від прийнятої стратегії експлуатації і періодичності процедур самоконтролю й профілактики [13, 16, 28].

1.3. Приклади автоматизованих систем контролю технологічних процесів

Залежно від специфіки конструктивного виконання СС (ТП), їх функціонального призначення, фізичних принципів, покладених в основу технологічних процесів, що відбуваються в контрольованих об'єктах, і від інших особливостей складних систем як об'єктів контролю структура автоматизованих систем контролю (АСК) може зазнавати істотних змін. Такі зміни є можливими через відмінності в принципах побудови окремих підсистем та істотну різницю в їхніх характеристиках точності, надійності, вартості й т. ін.

Проте склад блоків АСК в усіх випадках залишається зазвичай незмінним. Змінюються лише їх кількість, взаємозв'язки й у деяких

випадках додаються специфічні вузли й підсистеми, такі, як телеметричні, телемеханічні, різноманітні виконавчі й блокувальні пристрої тощо.

Існує велика кількість різних типів АСК ТП, що перевірялись на практиці в умовах промислового виробництва, транспорту й комунікацій. Розглянемо кілька прикладів таких систем, які можуть працювати і спільно, і автономно.

Автоматизована система для контролю радіоелектронних засобів [12, 27]. У загальному вигляді такі АСК будуються відповідно до блок-схеми, зображеної на рис. 1.6.



Рис. 1.6. Блок-схема АСК для контролю радіоелектронних засобів

До їх складу належать такі блоки: засоби зв'язку з об'єктом (ЗЗО), генератори стимульовальних і еталонних сигналів (ГС), блок комутації (БК), аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), засоби самоконтролю (ЗСК), обчислювальні пристрої (ОП), блок керування (БК), засоби ведення (ЗВ), засоби перезапису (ЗП); пульт керування й індикації (ПК), засоби

реєстрації результатів контролю (ЗР).

Засоби зв'язку з об'єктом призначено для узгодження виходів датчиків контрольованих параметрів з АСК і зведення цих параметрів до форми, зручної для перетворення на цифровий код. Блок комутації підмикає випробувальні сигнали від ГС до об'єкта контролю (ОК), а виходи датчиків — до входу АЦП.

З виходів перетворювачів цифрові значення вимірюваних параметрів надходять до обчислювального пристрою. Відповідно до програми ОП для кожного параметра виконує необхідні арифметичні операції. Результат обчислень порівнюється із значеннями допусків, що надходять із засобів уведення (ЗВ), визначаються придатність параметрів і відсоток їх відхилення від номінального значення в межах допуску $0 \pm 99 \%$.

Програма перевірки об'єкта, що записана в оперативній пам'яті (ОП), видається засобам введення в різні блоки АСК. Пристрій уведення визначає для кожного параметра порядок підключення випробувальних сигналів і сигналів стану, режими роботи АСК, команди в об'єкт, допуски і т. ін. Записує програму перевірки пристрій перезапису. Документування результатів контролю здійснюється пристроєм реєстрації.

Блок керування задає послідовність виконання в часі всіх операцій в системі контролю. Сигнали БК використовуються також для затримки вимірювання сигналів стану (реакції об'єктів) на час дії перехідних процесів. Контроль справності АСК здійснюється засобами самоконтролю, у яких реалізовано апаратний і тестовий види контролю.

Автоматизована система для контролю деформацій і температур під час випробувань конструкцій на міцність [13]. АСК цього типу містять у своєму складі дискретні вимірювальні засоби (ДВЗ), блок комутації датчиків (БК), централізовану обчислювальну систему (ЦОС), засоби зв'язку з об'єктом (ЗЗО) (рис. 1.7).

Вимірювання деформацій здійснюється з допомогою дротяних тензодатчиків, наклеєних на досліджувану конструкцію. Датчики підмикаються до трьох загальних плечей тензометричного мосту (М) комутаторами тензометричних датчиків (КТД).

Вихідні сигнали з мостів через комутатор вимірювальних діагоналей КДМ подаються на підсилювач низьких частот (ПНЧ). Сигнал з ПНЧ через транзисторний перемикач каналів (ТПК) надходить до АЦП. З регістра АЦП через ЗЗО код подається на цифрову обчислювальну систему ЦОС, де здійснюється оброблення інформації як під час проведення експерименту, так і після нього.

Однією з характерних особливостей системи є автоматичне балансування тензометричних мостів, для чого величина розбалансу на початку випробувань вимірюється та у вигляді коду записується в оперативний запам'ятовувальний пристрій (ОЗП) ЦОС. Під час вимірювання одночасно з підключенням тензодатчиків з вихідного регістра ЦОС надходить код початкового розбалансу відповідного датчика на БКК

(цифро-аналоговий перетворювач), вихідний сигнал з якого подається на вхід ПНЧ у протифазі з первинним сигналом.

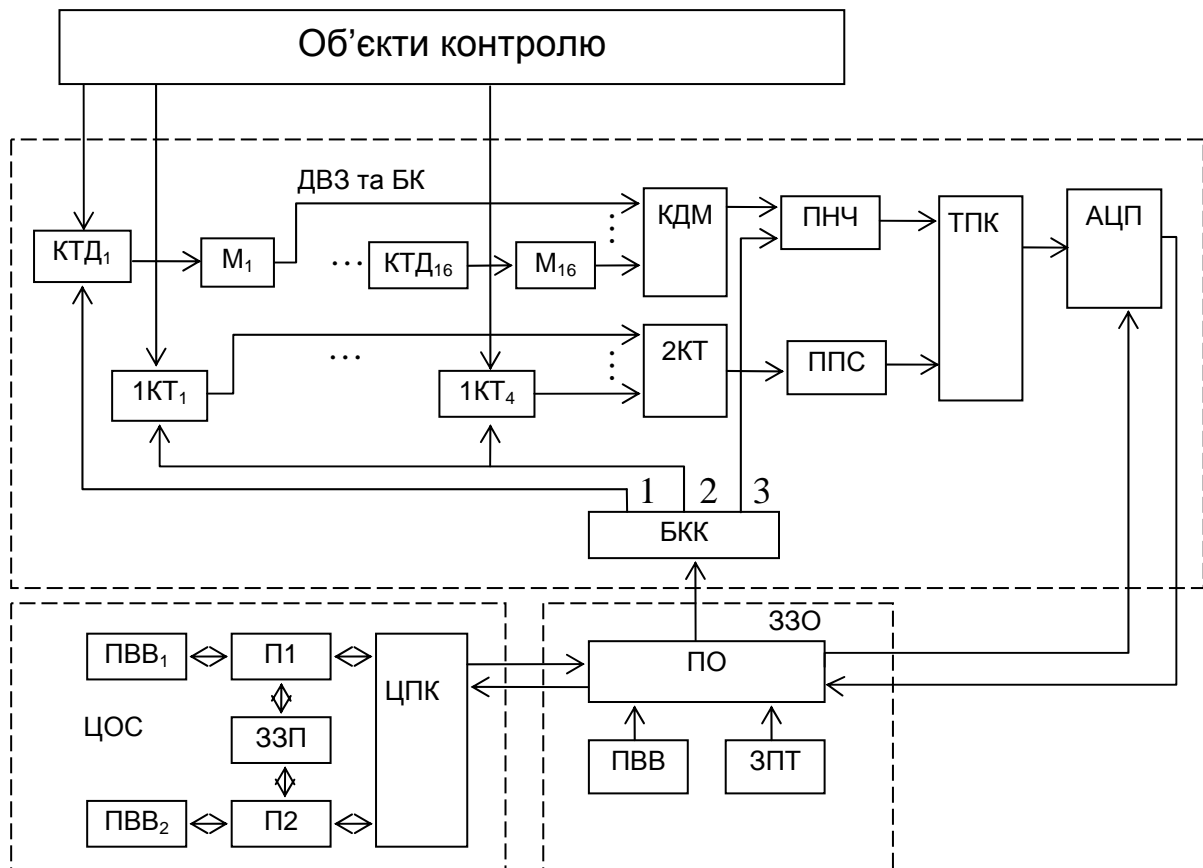


Рис. 1.7. Блок-схема АСК деформацій і температурних полів під час випробувань конструкцій на міцність

Значення температур вимірюється з допомогою термопар, робочі спаї яких фіксуються в точках досліджуваної конструкції. Термопари підмикаються до підсилювачів постійного струму (ППС) комутаторами 1КТ₁—1КТ₄ (перший ступінь) і 2КТ (другий ступінь). Вхідні ланцюги ППС гальванічно не зв'язані з виходом, що дає змогу вимірювати сигнали як із заземлених, так і незаземлених термопар. ППС виконано за схемою з безпосереднім зв'язком між каскадами в підсилювачі. Сигнал з ППС надходить на АЦП через ТПК.

Комутатори датчиків виконано на реле у вигляді окремих переносних блоків на 128 датчиків кожен. Особливістю комутатора є програмне керування, для чого перед початком випробувань в ОЗП ЦОС записуються номери датчиків в необхідній послідовності. Таке керування виключає можливість зсуву адреси і, крім того, дає змогу здійснювати вибіркове опитування датчиків відповідно до програми (можливе змінення програм і під час випробувань).

Цифрова обчислювальна система містить два процесори (П1 і П2), кожен з яких може використовуватися як самостійно, так і для

резервування, центральний пульт керування (ЦПК), накопичувач, ОЗП і засоби введення-виведення (ЗВВ). Під час вимірювання інформація записується в ОЗП, а потім після заповнення останнього переписується в накопичувач.

З ЦОС здійснюється керування комутатором, ТПК і запуск АЦП через заданий час після підмикання датчиків. Таким чином, у системі здійснено двосторонній зв'язок між ЦОС і вимірювальним пристроєм, тобто ЦОС не лише приймає й обробляє інформацію, але й керує процесом вимірювання.

Під час роботи системи періодично контролюється стан вимірювального пристрою шляхом порівняння «нуля» і калібрувального сигналу кожного каналу із заданими вставками. Починаючи з третього ступеня навантаження, прогноуються величини напруги для подальшого етапу навантаження з метою виявлення місць в конструкції, у яких напруга може перевищувати гранично допустимі межі.

Номери точок виводяться на друк, що дає змогу оператору своєчасно керувати ходом випробувань і запобігати передчасному руйнуванню конструкції. У системі можна за викликом оператора контролювати значення деформацій або температур у будь-якій точці конструкції.

До складу ЗСО належать пульт оператора (ПО), засоби підготовки даних (ЗПД) і пристрій уведення-виведення (ПУВ).

Основні характеристики системи:

— кількість датчиків	2500 (2000 тензодатчиків і 500 термопар)
— діапазон виміру деформацій, відн. од.	$\pm 1 \cdot 10^{-5} \dots \pm 0,5 \cdot 10^{-2}$
— діапазон виміру температур, °С	0...375; 0...750, 0...1250
— кількість одиниць вимірювального пристрою	діапазон шкали 0...1000
— швидкість опитування кожного з каналів, датчиків за секунду	30
— зведена гранична похибка (без урахування похибки датчиків), %	1
— довжина вимірюваних трас, м	до 150

1.4. Основні характеристики комп'ютерно-інтегрованих виробництв

Будь-яка система визначається якістьми, властивостями, характерними рисами, які є характеристиками системи. Усі їх можна умовно поділити на чотири класи: функціональні, експлуатаційні, економічні й технічні (табл. 1.2).

Усі характеристики системи визначаються її функціональним призначенням, повнотою можливостей, універсальністю. У розділі функціонального призначення зазвичай зазначають:

- перелік режимів роботи системи (автоматичний, напівавтоматичний, ручний, контрольний тощо);
- тип об'єкта, для якого призначено систему контролю й керування;
- характер роботи системи (неперервний, циклічний, одноразової дії тощо);
- інтенсивність і склад інформаційних потоків (кількість об'єктів (технологічних процесів), що обслуговуються, інформації щодо кожної точки об'єкта тощо);
- додаткові функції системи (реєстрація необхідної інформації, сигналізація про несправності, контроль самої системи та ін.).

Таблиця 1.2

Клас характеристик	Характеристика
Функціональні	Призначення Повнота можливостей Універсальність
Експлуатаційні	Надійність Живучість Безпечність Ергономічність: — забезпечення фізіологічних зручностей для людини; — створення умов для психологічного комфорту людини
Економічні	Вартість Окупність Рентабельність
Технічні	Спектри сигналів Завадостійкість Ефективність передання інформації Швидкодія Енергопостачання (потужність, напруга, частота) Елементна база Вимоги до зберігання, транспортування тощо Умови, за яких система виконує свої основні функції: — кліматичні (температура, вологість тощо); — механічні впливи (вібрація, трясіння, перенесення, удари тощо); — наявність завад та ін.

Під повнотою можливостей розуміється відношення обсягу перевірок різних приладів, підсистем, пристроїв об'єкта однією системою контролю й керування до загального обсягу перевірок.

Під універсальністю розуміється можливість використання однієї й тієї самої системи контролю й керування для різних комплексів при незначних доробках системи.

Технічний стан об'єкта або системи визначається сукупністю параметрів, що можуть змінюватися. Межі змінення цих параметрів

установлюються за нормативно-технічною документацією (НТД). Параметр (а в цілому й об'єкт, система, прилад, пристрій тощо) може й не відповідати вимогам НТД.

Кожна окрема така невідповідність є дефектом. Дефекти можуть бути наслідком природних процесів спрацьовування й старіння, пошкодження, порушення правил і норм експлуатації, а також можуть виникнути під час розроблення, виробництва й ремонту.

Надійність – властивість системи зберігати у часі й виставлених межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати необхідні функції в заданих режимах роботи й умовах застосування [15]. З визначення надійності випливає, що вона характеризується здатністю системи зберігати заданий рівень якості системи, який відповідає повністю працездатному стану системи (див. рис. 1.4, область $S_{ПТС}$), протягом заданого часу й на заданих умовах застосування.

Система контролю й керування КІВ може функціонувати в умовах або непередбачених, або важко прогнозовуваних впливів. Тому їй має належати властивість живучості, яка у найзагальніших рисах полягає у зберіганні хоча б часткової працездатності.

Живучість – властивість системи зберігати й автоматично відновлювати повністю або частково працездатний стан при виникненні в них відмов, спричинених у тому числі екстремальними (непередбаченими або важко прогнозованими) впливами [31].

Безпечність системи полягає в її здатності протистояти переходу до множини аварійних станів (S_{AC}). Очевидно, що аварійним є такий стан, у якому подальше застосування системи за призначенням є недопустимим, бо це може бути небезпечним для обслугового персоналу й навколишнього середовища.

Обслуговий персонал є головним елементом у системі контролю й керування. Він виконує найважливіші функції в системі:

- приймає остаточне рішення про стан об'єкта або системи контролю й керування;
- приймає рішення про порядок своїх подальших дій, залежно від стану об'єкта;
- розробляє різні варіанти порядку дій залежно від можливих станів об'єкта або системи.

Наявність у системі контролю й керування обслугового персоналу потребує узгодження характеристик системи й людини. Це — ергономічні вимоги, до яких належать:

- забезпечення фізіологічних зручностей для роботи обслугового персоналу (тобто забезпечення взаємозв'язку людини й апаратури, об'єкта й системи у формі й темпі, які є зручними й допустимими за навантаженням для людини);
- створення умов для психологічного комфорту обслугового персоналу (тобто повна доступність для розуміння персоналом цієї

інформації про об'єкт і систему; наявність розвинених засобів навчання, інструктування й тренувань тощо).

З економічних характеристик розглянемо тільки вартість, яка складається з вартості розроблення, виготовлення, випробувань та експлуатації. Визначення вартості одного комплексу апаратури є досить складним завданням. На всіх етапах її виробництва прагнуть до мінімізації абсолютних витрат.

Багато характеристик системи (надійність, живучість, вартість, завадостійкість, швидкодія та ін.) залежать від виду сигналів, які циркулюють у ній. Між об'єктом і засобами контролю й керування відбувається обмін інформацією під впливом завад.

Тому дуже важливо знати ступінь відповідності (достовірності) прийнятої інформації переданій. Цей ступінь називають завадостійкістю системи, тобто завадостійкість – це здатність системи протистояти шкідливій дії завад, унаслідок яких прийнята інформація буде якоюсь мірою відрізняться від переданої. При переданні інформації важливо знати не тільки ступінь її достовірності, але й час, витрачений на її передання й оброблення. Цей час залежить від ефективності каналу передачі й швидкодії всієї системи.

Ефективність каналу передачі – це його здатність забезпечити передання, приймання, оброблення, перетворення й подання заданої кількості інформації найбільш економічним способом.

Швидкодія системи – це швидкість реакції системи на збудження середовища на об'єкті контролю й керування (див. рис. 1.6), що є відрізком часу від моменту виникнення збудження середовища на об'єкті до моменту початку виконання керувальної дії. Швидкодія визначається за формулою [5]

$$t_3 = t_c + t_k + t_o + t_b + t_{k33} + t_n,$$

де t_3 – час збору інформації про поточний стан об'єкта; t_k – час передання повідомлення про поточний стан об'єкта; t_o – час оброблення поточного стану (тобто порівняння поточного стану з бажаним на певний момент); t_b – час вироблення (формування) керувального (або стимулювального) впливу; t_{k33} – час передання керувального (або стимулювального) впливу через канал зворотного зв'язку (КЗЗ); t_n – час дії виконавчого пристрою (час перехідних процесів).

Кожна зі складових t_3 залежить від багатьох факторів і перш за все від видів сигналів, які циркулюють в об'єкті й засобах контролю й керування, від швидкості оброблення інформації в окремих пристроях і системах в цілому, елементної бази, на якій побудовано апаратуру, завадостійкості й ефективності передання інформації.

1.5. Керування якістю технологічних процесів

Унаслідок проведення контролю мають вироблятися спеціальні керувальні дії на системи, що контролюються [10, 11, 13, 20, 26]. Ці дії переводять систему на повторне вирішення завдання (за наявності збоїв), перемикають на резерв пристрої (за наявності несправностей), що відмовили, а також сигналізують технічному персоналу про факт і місце виникнення несправності.

Керувальну дію можна реалізувати як автоматичними командами, так і по команді людини-оператора. В обох випадках основне призначення контролю полягає в забезпеченні потрібною інформацією (необхідної ймовірності) оператора, який приймає рішення про формування конкретних керувальних дій, що дають змогу забезпечити задану якість функціонування контрольованої великої системи або її підсистем, блоків, елементів і т. ін. Якщо необхідна поведінка, умови роботи системи, а також її властивості заздалегідь є відомими, то для керування якістю функціонування системи можна використати інформацію щодо послідовності керувальних дій у вигляді програми керування.

Якщо ж усі дані, необхідні для складання програми керування заздалегідь є невідомими, то формування керувальних дій можна організувати на основі інформації щодо стану, що складається під час функціонування системи. Такою інформацією можуть бути дані контролю стану керованої системи, попередні дані щодо її поведінки, збурювальні дії і характеристики керованої системи. Своєчасне перероблення цієї інформації забезпечує оперативне прийняття рішення з урахуванням ситуації, що конкретно склалася у поточний момент часу.

Основною метою керування є стабілізація показників якості функціонування системи і її складових елементів, забезпечення ефективності складної системи (технологічного процесу). У загальному випадку керування здійснюється за декілька ступенів (ієрархічно), як показано на рис. 1.8 [13].

Кожен ступінь ієрархії і їхня кількість мають визначатися прийнятою структурою побудови процесу контролю. Будь-яка регульована (керована) система повинна мати три основні елементи: систему контролю функціонування (джерело інформації щодо стану системи, що обслуговується), систему (схему) керування зміненням станів засобів і об'єкт керування (експлуатовану систему).

Ієрархія процесів контролю відображає ступінчастість систем, що обслуговуються: контроль функціонування систем в цілому (ФК-С), контроль функціонування підсистеми (ФК-П), контроль функціонування елементів (ФК-Е), місцевий контроль (ФК-М). Характерна особливість цієї ієрархії полягає в тому, що безпосередньо виконавчим елементом є останній ступінь — місцевий контроль (ФК-М). Він містить засоби

(бригади) технічного обслуговування, які безпосередньо здійснюють профілактику і ремонт апаратно-програмних засобів СС. Під час функціонування СС (ТП) кожен ступінь керування станом, використовуючи результати контролю відповідного ступеня системи, дає потрібні вказівки, тобто керує підпорядкованим ступенем. Дія команди керування триває доти, доки місцева система керування з допомогою виконавчого механізму, тобто засобів технічного обслуговування (ЗТО), не виконає команду пошуку й заміни пристроїв, що відмовили.

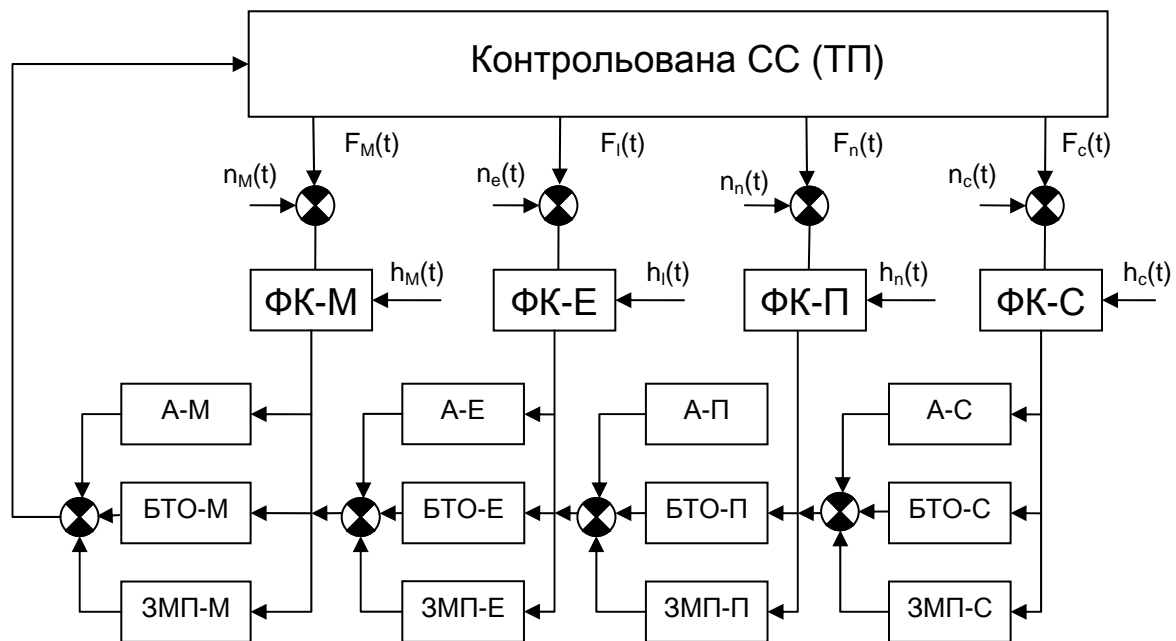


Рис. 1.8. Ієрархічна структура контролю функціонування СС (ТП)

Місцевий контроль (ФК-М) – найглибший, але локальний. Контроль системи (ФК-С) зазвичай неглибокий, але загальніший і повніший щодо охоплення елементів контрольованої системи.

Зі збільшенням рангу ступеня керування ієрархічної системи рівень контрольованих показників якості функціонування підвищується [13]:

$$F_M \in F_E \in F_P \in F_C, \quad (1.2)$$

де F_C, F_P, F_E, F_M – множини показників якості, що контролюються відповідно на рівні системи, підсистеми, елемента й місцевого контролю.

Особливістю функціонування різних систем є наявність перешкод $n_M(t), n_E(t), n_P(t), n_C(t)$ (наприклад, відмова або старіння елементів нижчого рівня), помилок алгоритмів контролю, відмов і збоїв апаратури контролю (наприклад, помилкових тривог), збурень в засобах контролю $h_M(t), h_E(t), h_P(t), h_C(t)$, а також запізнення в ланцюзі кожної ланки (див. рис. 1.8).

Остання властивість обумовлена тим, що команди з вищого ієрархічного ступеня на нижчий передаються і виконуються із затримкою

через інерційність засобів технічного обслуговування, витрати часу на проведення контролю, передання і приймання отриманої інформації, оброблення інформації, прийняття рішення, видачу відповідних інструкцій підпорядкованим ланкам, пошук несправності, доставку змінного елемента зі складу запасного майна і приладдя (ЗМП), ремонт (заміну несправного елемента справним). Такими є основні особливості узагальненої моделі експлуатації складної системи (технологічного процесу) з контролем.

Цілі керування для кожного зі ступенів можуть бути різними. Кожна локальна система здійснює оперативне керування відповідно до свого часткового критерію або системи критеріїв з обмеженнями, що впливають з особливостей експлуатації апаратно-програмних пристроїв системи або підсистеми, а також з вимог більш загального критерію системи, вищої за рівнем.

Кінцева мета керування — стабілізація рівня ефективності системи, що обслуговувається, і його регулювання залежно від вимог, яким має задовольняти система під час експлуатації. Таким чином, процес експлуатації системи необхідно розглядати не лише як комплекс заходів, спрямованих на підвищення й підтримку високого ступеня готовності до роботи, але і як багатоступінчасту систему регулювання й керування якістю функціонування контрольованої складної системи (технологічного процесу).

На основі зіставлення реального $F(t)$ і необхідного $F_n(t)$ значень показників якості можливості окремих засобів і системи в цілому постійно контролюються і регулюються під час експлуатації. При цьому керування параметрами режиму експлуатації (періодичністю і тривалістю контролю, профілактичних робіт, кількістю і складом ремонтних засобів (бригад), комплектацією ЗМП, величинами технічних параметрів і т. ін.) здійснюється так, щоб забезпечувався максимум ефективності системи в заданих умовах експлуатації (не нижче за необхідний $F_n(t)$ рівень). Таке керування можна інтерпретувати як активний захист від збурень, що виникають в системі внаслідок появи відмов, тобто подій, що призводять до втрати працездатності окремими засобами, підсистемами або системою в цілому.

Відмови в системі можуть виникати як через аварії, так і через дії несприятливих чинників зовнішнього середовища. Унаслідок дії відмов складна система прийматиме деякі цілком конкретні стани, що визначають її можливості в кожний поточний момент часу. Звичайно, збитки унаслідок аварій в системі та наявності завад переводитимуть систему в стани зі зниженими можливостями.

Поява відмов і умисне відімкнення елементів системи з метою проведення профілактичних (регламентних) робіт для виявлення поступових відмов будуть призводити до подальшого зниження реальних можливостей системи. Однак на відміну від попереднього випадку тут є можливість керувати деякими станами системи, тобто дозволяти або

забороняти в певний момент часу відімкнення з метою профілактики робочих і резервних засобів в конкретній ситуації.

Таким чином, вирішуючи завдання керування, треба враховувати не лише факти появи відмов і планових профілактичних відімкнень засобів системи, але й інші причини (аварії, перешкоди і т. ін.). Таке врахування може здійснюватися як в математичних виразах комп'ютерного алгоритму, так і евристично людиною-оператором, яка є найкращою інтегральною ланкою сучасних систем керування. Саме людина-оператор здатна координувати роботу всіх елементів системи з урахуванням чинників, які заважають, зв'язуючи їх в єдине ціле.

У зв'язку з цим алгоритм керування якістю (готовністю й надійністю) функціонування великих систем доцільно будувати з двох частин, одну з яких розрахувати на застосування комп'ютера, а другу — на використання інтегральних можливостей оператора. У цьому випадку на комп'ютері отримують кількісну оцінку показників готовності, надійності системи й вибір раціонального варіанта керування станами її окремих елементів для забезпечення заданого рівня готовності й надійності системи в цілому. Оператор на основі евристичного інтегрування отриманих від комп'ютера результатів і урахування всіх несприятливих чинників зовнішнього середовища приймає остаточне рішення щодо якості функціонування системи.

Така взаємодія між комп'ютером і оператором при вирішенні завдання керування є цілком допустимою, оскільки затримка під час прийняття рішення на одиниці секунд є дуже малою порівняно з часом виконання прийнятого рішення (тривалість профілактичних (регламентних) заходів обчислюється багатьма годинами).

Розглянемо основні принципи будування алгоритму керування якістю технологічного процесу. Сучасні складні системи мають не один, а багато керованих каналів, що є підсистемами або окремими елементами системи. Кожен з каналів керування з огляду на передання інформації та розрахунок показників надійності є послідовним ланцюжком таких технічних засобів: джерела інформації, лінії зв'язку, засоби передання даних, один або декілька спеобчислювачів пунктів керування, засоби сполучення й відображення, а також виконавчі пристрої. Людина-оператор є невід'ємною частиною всіх каналів керування.

Від усіх об'єктів, у тому числі й резервних, з кожного з керованих каналів на вхід обчислювального комплексу пункту керування складної системи мають надходити дані про стан технічних засобів каналу, що видаються як автоматично (за результатами проходження контролю або спрацювання відповідних перемикачів режимів використання засобів), так і напівавтоматично (шляхом подання відповідних сигналів, натиснення оператором або обслуговим технічним персоналом кнопок, набору коду на пультах керування).

Стан технічних засобів у будь-який момент часу визначається режимом

їхньої роботи, мірою справності, а також наявністю і характером зовнішніх впливів. До таких впливів належать заходи з підтримки готовності технічних засобів: ремонт, профілактичні (регламентні) роботи, вмикання, вимикання, а також використання в режимі роботи або резерву.

Вихідними даними алгоритму керування якістю функціонування системи є команди: «Відімкнути пристрої для профілактики» («Відмикання дозволяю»); «Відмикання забороняю» («Утриматися від профілактики»); «Увімкнути пристрій» («Згорнути профілактику»), а також інформація щодо поточних значень показників готовності й надійності функціонування окремих пристроїв, підсистем і системи в цілому, яка оперативно має видаватися на засоби відображення оператора й центральні пункти керування системи.

Відомості щодо технічного стану й режимів використання основних і резервних засобів системи потрібні для оперативного оцінення поточних значень їхніх показників готовності K_z , а також для вибору відповідних правил (формул, алгоритмів) розрахунку показників надійності $P(t)$. Це пояснюється тим, що правила для розрахунку цих показників будуть різними залежно від того, чи мають засоби резерв, чи є резервні засоби справними чи ремонтуються, ввімкнено резерв чи вимкнено (перебуває в «гарячому» чи «холодному» стані), проводиться профілактика резервного обладнання чи ремонт. Якщо проводиться ремонт, то скільки ремонтних бригад бере участь у ремонті) й т. ін.

Результати оцінювання величин K_z і $P(t)$ надалі використовуються для обчислення узагальненого показника $K_{ен}$ — коефіцієнта експлуатаційної надійності пристрою. Його значення є ймовірністю того, що засіб є працездатним у будь-якій довільний момент часу і пропрацює безвідмовно протягом заданого (потрібного) інтервалу часу роботи t . Зв'язок між показниками K_z , $P(t)$ і $K_{ен}$ визначається виразом [13]

$$K_{ен} = K_T P(t). \quad (1.3)$$

Отримані значення використовують для обчислення ймовірності $P_{нк}$ нормального функціонування кожного керованого каналу в цілому. Значення ймовірностей нормального функціонування усіх каналів і керувального пункту системи використовуються для визначення коефіцієнта збереження ефективності $K_{еф}$ системи в цілому. Цей коефіцієнт чисельно дорівнює відношенню ефективності M_p системи з реальною надійністю функціонування засобів до її ефективності M_0 , обчисленої для умови абсолютно надійних засобів:

$$K_{еф} = M_p / M_0. \quad (1.4)$$

Значення величини $K_{еф}$ залежить від інтенсивності відмов, наявності контролю робочих і резервних засобів, ймовірностей появи відмов в усіх

керуваних каналах, що функціонують, а також від ситуації, що реально склалася в кожному каналі через втрату ними працездатності з різних причин (вимкнення, проведення профілактики, ремонту). З урахуванням цих чинників обчислюється значення $K_{\text{еф}}$ для можливих стратегій (варіантів) управління готовністю і надійністю системи.

Доцільним є вибір такого варіанта СС (ТП), який забезпечує максимально можливе значення $K_{\text{еф}}$ (або не нижче за необхідний рівень), і для виконання цього варіанта (прийнятого рішення) на засоби відображення видаються рекомендації для оператора. Після прийняття оператором запропонованого варіанта рішення формується необхідна команда, яка подається до відповідного каналу.

Основні блоки алгоритму керування якістю функціонування СС (ТП), а також послідовність їх реалізації:

1. Приймання інформації щодо технічного стану засобів СС (ТП) і режимів їх використання по кожному з керуваних каналів окремо. Накопичення відомостей щодо загальної кількості несправностей, часу справної роботи, часу відновлення, часу простоїв для профілактик і контрольних перевірок.
2. Визначення поточних значень характеристик надійності засобів СС (ТП): середнього часу між відмовами, середнього часу відновлення, середнього часу профілактик.
3. Обчислення показників готовності до роботи і надійності функціонування засобів СС (ТП) з урахуванням їхнього поточного стану.
4. Визначення поточних значень імовірностей нормального функціонування (коефіцієнта експлуатаційної надійності) для кожного керувального каналу (підсистеми).
5. Визначення оптимального періоду проведення профілактичних і регламентних контрольних перевірок окремих засобів і керуваних каналів у цілому.
6. Вибір можливих варіантів керування технічним станом засобів СС (ТП).
7. Оцінювання впливу можливих варіантів керування станом засобів СС (ТП) на узагальнений показник якості системи ($K_{\text{еф}}$). Вибір найкращого варіанта (прийняття рішення).
8. Видача на засоби відображення оператора СС (ТП) команди керування (рекомендації).

На вхід першого блоку алгоритму від усіх засобів системи надходять ознаки їхніх станів по кожному з керуваних каналів, а також ряд часових характеристик (часу справної роботи пристроїв, часу простоїв і відновлення і т. ін.). На основі прийнятої інформації в другому блоці робиться накопичення характеристик надійності.

У третьому блоці алгоритму розраховуються значення коефіцієнтів експлуатаційної надійності для кожного контрольованого засобу СС (ТП) з урахуванням отриманої інформації щодо їхнього технічного стану в поточний момент часу.

Нарешті, у сьомому блоці алгоритма приймається остаточне рішення щодо вибору конкретного варіанта (навіть якщо він лише один) з погляду на інтереси усієї складної системи, а не окремого засобу чи каналу керу-

вання. Тут обчислюється значення коефіцієнта збереження ефективності для СС (ТП) у цілому з урахуванням не лише реальних значень готовності і надійності функціонування каналів, але й ситуації, що реально склалася, у разі втрати керованими каналами здатності парацювати з інших причин. Розрахунки виконуються для кожного з можливих варіантів керування, вибір яких було зроблено в шостому блоці. Шляхом порівняння отриманих значень $K_{\text{еф}}$ з необхідним значенням $K_{\text{еф}_{\text{пк}}}$ для кожного з варіантів перевіряється виконання умови $K_{\text{еф}} \geq K_{\text{еф}_{\text{пк}}}$. За результатами порівняння визначається відповідна стратегія керування СС (ТП), яка реалізується шляхом подання команди призначення профілактичних робіт відповідному пристрою або підсистемі в цілому. Значення узагальненого показника надійності функціонування СС (ТП), тобто коефіцієнта збереження ефективності $K_{\text{еф}}$ можна розрахувати за такою методикою [10]:

— визначення коефіцієнта збереження ефективності

$$K_{\text{еф}_c} = K_{\text{еф}_{\text{пк}}} K_{\text{еф}_п}; \quad (1.5)$$

— визначення коефіцієнта експлуатаційної надійності пункту керування

$$K_{\text{еф}_{\text{пк}}} = K_{\text{ен}_п}; \quad (1.6)$$

— визначення коефіцієнта збереження ефективності керованих систем

$$K_{\text{еф}_п} = \frac{M_p}{M_v} = \frac{\sum_{v=1}^{V_k} P_v M_p}{M_v}; \quad (1.7)$$

— визначення коефіцієнта збереження ефективності функціонування СС та його складових

$$K_{\text{еф}_c} = K_{\text{ен}_{\text{пк}}} \sum_{v=1}^{V_k} P_v \phi_v; \quad (1.8)$$

$$P_v = \prod_j K_{\text{ен}_j} \prod_l (1 - K_{\text{ен}_l}); \quad (1.9)$$

$$\phi_v = \frac{M_v}{M_0}; \quad (1.10)$$

де $K_{енпк}$ – коефіцієнт експлуатаційної надійності засобів центрального пункту керування СС (ТП);

$K_{ефл}$ – коефіцієнт збереження ефективності функціонування центрального пункту керування;

Φ_v – відносне значення ефективності великої системи у v -му стані;

P_v – імовірність знаходження великої системи у v -му стані (відмова v -го керованого каналу або групи каналів);

M_v – абсолютне значення ефективності СС (ТП) у v -му стані;

M_p – абсолютне значення ефективності СС (ТП), знайдене з урахуванням реальної надійності підсистем (керованих каналів) і їхніх засобів;

M_o – максимально можливе значення ефективності СС (ТП), обчислене за умови абсолютної надійності усіх керованих каналів і засобів центрального пункту керування.

Імовірність P_v знаходження системи у v -му стані дорівнює добутку показників експлуатаційної надійності усіх j справних у v -му стані керованих каналів (підсистем) і показників ненадійності усіх l каналів, що вийшли з ладу в цьому стані. Кожному стану СС (ТП) відповідає певне значення M_v , тому коефіцієнт збереження її ефективності можна подати добутком показників надійності усіх послідовно з'єднаних елементів системи.

Числові значення показника ефективності системи M_v у різних v -х станах визначаються заздалегідь і як константи записуються до запам'ятовувального пристрою спецобчислювача, з допомогою якого й реалізується алгоритм керування якістю функціонування СС (ТП).

Уся отримана від підсистем і кожного керованого каналу інформація щодо їхнього технічного стану («Справно», «Несправно») і режимів роботи («Основна робота», «Профілактика», «Відмова», «Ремонт», «Увімкнено», «Вимкнено»), а також усі варіанти рішення, прийняті автоматично на основі алгоритму керування якістю функціонування СС (ТП) (готовність системи, значення показників готовності по кожному керованому каналу та величина коефіцієнта збереження ефективності для системи в цілому) доцільно видавати оператору на засоби відображення.

Оператор, оцінюючи обстановку, що склалася, і керуючись знаннями, накопиченим досвідом, вимогами керівних документів, можливими варіантами дії в кожний конкретний момент часу, може не погодитися із запропонованим алгоритмом рішення. У цьому випадку він може скасувати його або прийняти інше рішення, уводячи відповідні команди через засоби керування або віддаючи вказівки керівникам підлеглих підсистем, технічному персоналу й органам обслуговування.

Наприклад, переведення окремих підсистем СС (ТП) у режим профілактики (регламенту) здійснюється відповідно до заздалегідь узгодженого і затвердженого плану-графіка. Згідно з ним на пункт

керування СС (ТП) будуть надходити запити. Можливими є випадки, коли алгоритмічно обчислене значення $K_{\text{еф}}$ для системи з урахуванням виконання цього запиту і ситуації, що фактично склалася (відмови, ремонт, профілактик усіх засобів системи), матиме значення не нижче від заданого (потрібного) рівня $K_{\text{еф}_{\text{ПК}}}$, тобто матиме місце нерівність $K_{\text{еф}} \geq K_{\text{еф}_{\text{ПК}}}$. У цьому випадку комп'ютер видасть рекомендацію людині-оператору: дозволити профілактику. Проте на основі отриманої інформації щодо технічного стану засобів підсистем СС (ТП), заводової обстановки, стану зовнішнього середовища, наявності аварій і результатів оцінення поточних можливостей системи план-графік можна скоригувати людиною-оператором. Зокрема, у разі порушення нормальної роботи одних засобів, доцільної з огляду на забезпечення заданого рівня надійності СС (ТП), може бути часова затримка при проведенні профілактики (регламенту) інших засобів або керованих каналів.

Також доцільною може виявитися відміна профілактики (регламенту) засобів системи або дострокове проведення профілактичних робіт з метою приведення системи до стану підвищеної готовності на певний інтервал часу.

Таким чином, у наведеній схемі керування готовністю і надійністю функціонування СС (ТП) (рис. 1.10) людина-оператор залучається для резервування функцій, що виконує комп'ютер, і контролю рішень, які приймаються автоматично (алгоритмічно). На оператора також покладається вирішення багатьох важко або взагалі неформалізованих завдань забезпечення готовності системи. До таких завдань належать:

- будування і коригування календарних планів-графіків різних контрольних оглядів і проведення профілактичних і ремонтних заходів;
- регулювання запасів змінних відновлюваних елементів і матеріалів, що витрачаються;
- визначення продуктивності ремонтного органу і ритму його роботи;
- визначення необхідної кількості й кваліфікації фахівців, які чергують позмінно (склад розрахунку);
- розроблення плану постачань матеріалів і деталей із зовнішніх джерел і визначення напрямку, протяжності й пропускної спроможності комунікацій тощо.

Основним методом вирішення усіх завдань людиною-оператором є евристичний. Проте сьогодні видається можливим чітко й ґрунтовно викласти деякі з основних принципів будування евристичного алгоритму вирішення завдання керування готовністю системи, якими має керуватись оператор при прийнятті рішень. Ці принципи ґрунтуються на відомих теоремах, висновках і положеннях теорії надійності [13].

1. Якщо надійшов запит на проведення профілактики (ремонт) елемента системи, який відмовив або знаходиться на ремонті, то профілактику доцільно завжди дозволяти, оскільки поєднання інтервалів

метою зменшення сумарних непродуктивних втрат часу на простої.

3. Якщо надійшов запит на проведення профілактики непрацездатних з різних причин керованих підсистем і каналів, які не пов'язані з відмовами, ремонтом і контрольними перевірками (наявність завад, аварії, відімкнення для демонтажу, доопрацювання і т. ін.), то профілактику слід дозволяти, оскільки відімкнення засобів для профілактики при цьому ніяк не позначається на якості функціонування непрацездатних каналів і підсистем.

4. При надходженні розпоряджень від вищого керівництва щодо приведення системи в підвищену готовність має подаватися команда на всі підсистеми й пристрої про тимчасову відміну всіх профілактичних робіт, оскільки тільки в цьому випадку (тобто коли резервні засоби є працездатними) можна забезпечити максимальну ступінь готовності й безвідмовності засобів, каналів і системи в цілому для виконання поставленого завдання.

5. Якщо з усіх взаємно резервованих каналів один виявляється непрацездатним з будь-якої причини, то для підвищення ступеня готовності справного каналу до роботи доцільно на ньому заборонити штучне (планове) виведення засобів з робочого стану шляхом відімкнення з метою проведення профілактичних і регламентних робіт. Невиконання такої умови може спричинити падіння ступеня готовності каналу до катастрофічного рівня.

Таким чином, автоматизоване вирішення завдання керування якістю функціонування СС (ТП) з метою забезпечення заданого рівня її готовності й безвідмовності є можливим. Проте для підвищення ефективності функціонування системи з урахуванням зовнішніх обмежних чинників (перешкод, аварій і т. ін.), а також ситуації, що склалася, доцільно як інтегральну ланку залучати в систему людину-оператора, яка б могла координувати роботу усіх її елементів, зв'язуючи їх у єдине ціле.

Контрольні запитання

1. Наведіть означення об'єкта керування.
2. Які операції виконують елементи СКК?
3. Назвіть відмінності між видами автоматизації — частковою, повною автоматизацією контролю і повною автоматизацією керування.
4. Які елементи мають належати до складу системи автоматичного контролю?
5. Наведіть класифікацію елементів систем автоматичного керування й контролю за функціональним призначенням.
6. Назвіть класи характеристик СКК СС.
7. Наведіть перелік технічних характеристик СКК СС.
8. Перелічіть технічні стани СС. Наведіть їхню стислу характеристику.
9. Які функції в складній системі виконує обслуговий персонал?

10. Які чинники впливають на швидкодію складної системи?
11. Обґрунтуйте вибір шляхів використання інформації, отриманої під час контролю, для керування надійним функціонуванням складної системи.
12. Назвіть складові коефіцієнта експлуатаційної надійності системи.
13. Назвіть складові блок-схеми алгоритму керування складною системою.
14. Назвіть складові ієрархічної структури контролю функціонування складної системи.
15. Обґрунтуйте зв'язок між відомостями, повідомленнями й сигналами.

2. ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Технологічні процеси у загальному випадку зводяться до виконання різноманітних операцій над речовинами, які перебувають у твердому, рідкому або газоподібному станах, енергією або інформацією. Різноманітність систем контролю й керування КІВ, призначених для контролю й керування різними за своєю фізичною природою технологічними процесами, спричиняє велику кількість елементів як відносно їх конструктивного виконання, фізичних принципів, покладених в основу побудови, роду енергії, використаної під час роботи, так і щодо функцій, що вони виконують.

Для контролю технологічних процесів у сучасних КІВ необхідно оперативно визначати багато параметрів, а саме *температуру, тиск, хімічний склад, вологість, радіоактивність, лінійні й кутові розміри, швидкості (прискорення)* тощо. Для визначення параметрів технологічних процесів використовують датчики [1–4, 6–8, 13, 16].

Датчик – це пристрій, що приймає зовнішні дії та реагує на них зміненням електричних сигналів. Під зовнішньою дією розуміється кількісна характеристика об'єкта контролю й керування, його властивість або якість, які необхідно прийняти й перетворити на електричний сигнал. Призначення датчиків – реакція на певну зовнішню фізичну дію та перетворення її на електричний сигнал, сумісний із сигналами у схемах систем контролю й керування.

Таким чином датчик – це перетворювач фізичної величини (часто неелектричної) на електричний сигнал.

Вихідними сигналами датчиків є напруга, струм, заряд, які описуються амплітудою, частотою, фазою або цифровим кодом. Цей набір характеристик називають форматом вихідного сигналу.

Таким чином, кожен датчик характеризується набором вхідних параметрів (будь-якої фізичної природи) і вихідних електричних параметрів.

2.1. Класифікація датчиків

Будь-який датчик є перетворювачем енергії. Незалежно від типу вимірюваної величини завжди передається енергія від досліджуваного об'єкта до датчика. Робота датчика – це особливий випадок передання інформації, а будь-яке передання інформації пов'язане з перетворенням енергії. Поняття «датчик» необхідно відрізнити від поняття «перетворювач». Перетворювач конвертує один тип енергії на інший, тоді як датчик перетворює будь-який тип енергії зовнішньої дії на електричний сигнал. Перетворювачі можуть виконувати також функції *приводів*.

Привід можна визначити як пристрій, що є протилежним до датчика, оскільки він перетворює електричну енергію зазвичай на неелектричну (наприклад електричний двигун, який перетворює електричну енергію на механічну). Класифікаційні ознаки датчиків поділяють на основні й другорядні. Тому при їх виборі потрібно розглянути функцію окремого елемента в системі, його характерні риси.

Перетворювачі можуть бути частиною складених датчиків (рис. 2.1).

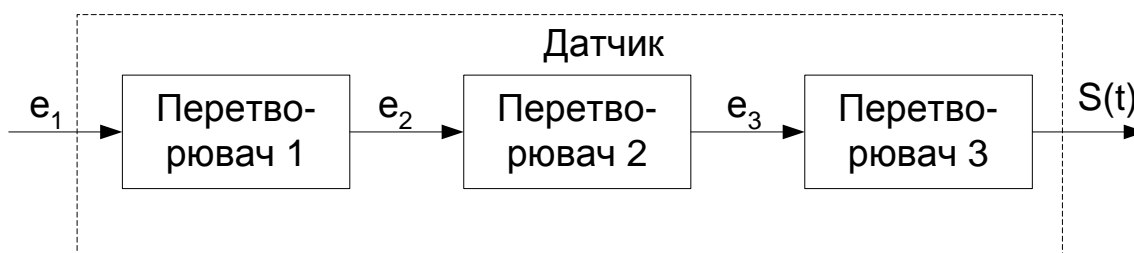


Рис. 2.1. Узагальнена структура датчика (перетворювачі 1–3 здійснюють перетворення різних видів енергії)

До структури складених датчиків зазвичай входить щонайменше один датчик прямої дії і декілька перетворювачів. Датчиками прямої дії називають датчики, які побудовано на фізичних явищах, що дають змогу проводити безпосереднє перетворення енергії зовнішньої дії на електричні сигнали. Прикладами таких фізичних явищ є фотоефект, ефекти Холла та Зеєбека [6].

У табл. 2.1 показано узагальнену класифікацію датчиків [3, 6, 7, 16]. За наявності додаткового джерела енергії всі датчики можна поділити на *пасивні* й *активні*. Прикладами активних датчиків є термістори, резистивні тензодатчики [3]. Датчики можна поділити на дві групи: *датчики прямої дії* і *складені датчики*. Датчики прямої дії перетворюють зовнішню дію безпосередньо на електричний сигнал, використовуючи для цього відповідне фізичне явище, тоді як складені датчики, перш ніж отримати електричний сигнал на виході кінцевого датчика прямої дії, здійснюють декілька перетворень енергії.

Таблиця 2.1

Ознаки класифікації	Датчики		
Наявність джерела енергії	Активні	Пасивні	
Вибір точки відліку	Абсолютні	Відносні	
Характеристики	Чутливість Швидкодія Вартість Лінійність Перевантажувальна здатність	Стабільність Наявність гістерезису Габарити Вибірковість Розрізнявальна здатність	Точність Ресурс Вага Наявність мертвої зони Формат вихідного сигналу
Матеріал датчика	Тверде тіло (провідник, напівпровідник, діелектрик)	Рідини, газу, плазма	Біологічні тканини
Засоби детектування	<i>Фізичні</i> (електричні, магнітні й електромагнітні хвилі), тепло й температура, механічні хвилі й переміщення, радіоактивне випромінювання	<i>Хімічні</i>	<i>Біологічні</i>
Механізми перетворень	<i>Фізичні</i> (термо- й фотоелектрика, електромагнетизм, термо-, фото- й електропружність, термооптика)	<i>Хімічні</i> (хімічні перетворення, фізичні перетворення, електрохімічні процеси, електроскопія)	<i>Біологічні</i> (біохімічні перетворення, фізичні перетворення, спектроскопія)
Зовнішні дії	<i>Акустичні</i> (амплітуда, фаза, поляризація хвилі, спектр і швидкість)	<i>Електричні</i> (заряд, струм, потенціал, напруга, електричне поле, провідність, діелектрична проникність)	<i>Магнітні</i> (магнітне поле, магнітна проникність, магнітний потік)
	<i>Механічні</i> (розташування, сила, прискорення, тиск, деформація, маса, щільність, рух, момент, швидкість потоку, втрата маси, форма, шорсткість, піддатливість, орієнтація)	<i>Оптичні</i> (амплітуда, фаза, поляризація хвилі, спектр і швидкість, коефіцієнт відбиття, відбивна здатність потоку, поглинання)	<i>Теплові</i> (температура, потік, тепло, теплопровідність)
	<i>Хімічні</i> (ідентичність, концентрація, стан)	<i>Біологічні</i> (біомаса, вид, концентрація, стан)	<i>Випромінювання</i> (тип, енергія, інтенсивність, потужність)

Пасивний датчик не потребує додаткового джерела енергії. Як реакція на змінення зовнішньої дії на його виході завжди виникає електричний сигнал. Це означає, що такий датчик перетворює енергію зовнішнього сигналу на вихідний сигнал. Прикладами пасивних датчиків є термопари, фотодіоди й п'єзоелектричні чутливі елементи.

Активні датчики для своєї роботи потребують зовнішньої енергії, що має назву сигналу збудження. При формуванні вихідного сигналу активний датчик так чи інакше впливає на сигнал збудження. Оскільки такі датчики змінюють свої характеристики, їх іноді називають параметричними. Певні параметри активних датчиків модулюють сигнали збудження, і ця модуляція несе в собі інформацію щодо значення вимірюваної величини.

Датчики не працюють самі по собі, а входять до складу систем контролю й керування. У цих системах датчики можуть бути як зовнішніми, так і вбудованими. Їх розміщують на входах вимірювальних приладів для реагування на зовнішні дії та інформування системи щодо змін у навколишньому середовищі.

Також їх установлюють усередині складних систем (систем контролю й керування) з метою моніторингу умов їх функціонування. Датчики є невід'ємною частиною систем контролю технологічних процесів. На рис. 2.2 показано блок-схему системи контролю й керування, що складається із системи збору даних і керувального пристрою (комп'ютера). Суб'єктами контролю можуть бути як матеріальні об'єкти, так і технологічні процеси.

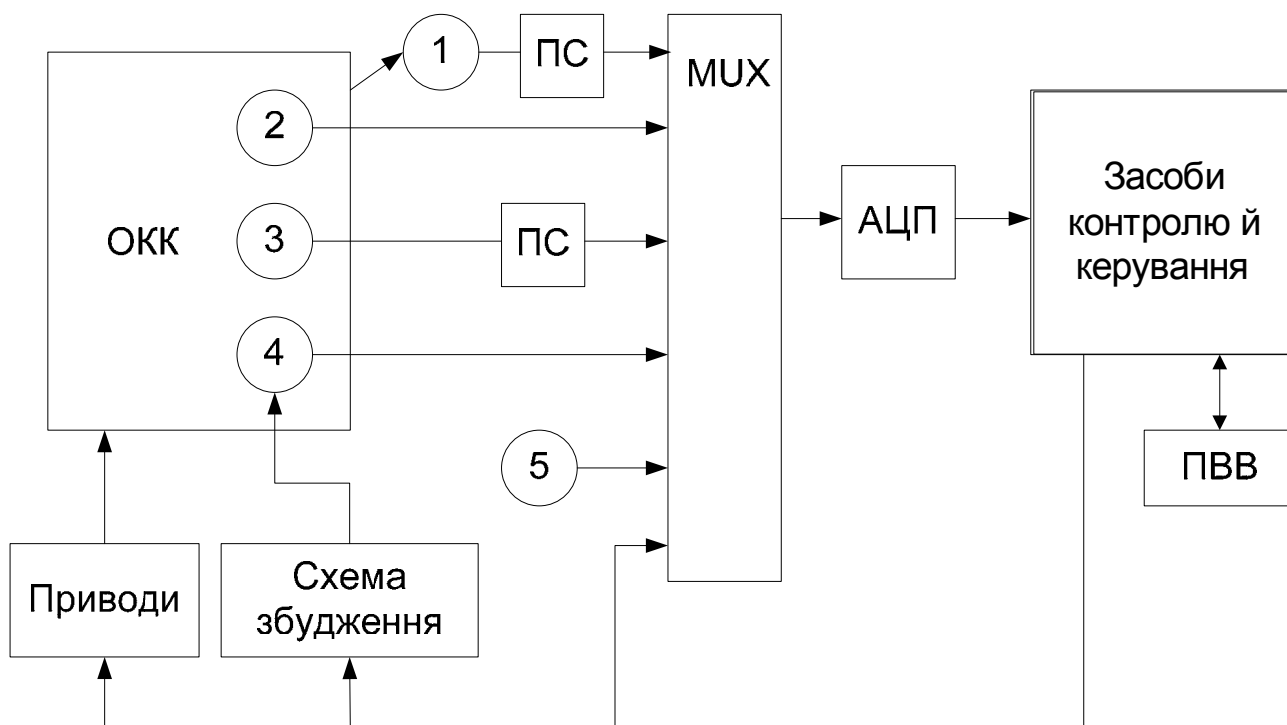


Рис. 2.2. Приклад системи контролю й керування

Інформація щодо стану контрольованого об'єкта (технологічного процесу) збирається датчиками, частину з яких (2, 3 і 4) розташовано на поверхні або усередині об'єкта контролю й керування. Датчик 1 не має безпосереднього зв'язку з об'єктом, тобто є безконтактним. Датчик 5 може виконувати різні функції, наприклад контролювати умови всередині самої системи. Датчики 1 і 3 не можна безпосередньо приєднати до стандартних електронних схем через невідповідність форматів вихідних сигналів. Для їх підімкнення необхідні спеціальні інтерфейсні пристрої (пристрої спряження) — перетворювачі сигналів. Датчики 1, 2, 3 і 5 є пасивними, оскільки для формування вихідних сигналів їм не потрібно додаткової електричної енергії. Датчик 4 є активним, для його функціонування потрібен допоміжний сигнал. Такий сигнал формується схемою збудження. При цьому датчик 4 модулює його значення відповідно до зміннення контрольованого параметра. Прикладом активного датчика є температурно-чутливий резистор (термістор), який працює від джерела постійного струму.

З виходів датчиків сигнали надходять на мультиплексор. Якщо вихідні сигнали датчиків є аналоговими (неперервними), то вони надходять на аналого-цифровий перетворювач (АЦП), якщо цифровими — то безпосередньо на комп'ютер.

Комп'ютер (пристрій керування) здійснює керування роботою мультиплексора й АЦП і надсилає керувальні сигнали до приводів. Приводи безпосередньо впливають на стан об'єктів контролю й керування і підтримують бажану траєкторію їх руху. Як приводи можуть бути використані електричні двигуни, реле, гідравлічні й пневматичні циліндри тощо. До складу системи контролю можуть входити також периферійні пристрої (накопичувачі інформації контролю, монітори, сигналізатори тощо) та інші компоненти, які не показано на рис. 2.2.

Залежно від вибору точки відліку зовнішнього сигналу датчики можна поділити на *абсолютні й відносні*. Абсолютний датчик визначає зовнішній сигнал в абсолютних фізичних одиницях, тоді як вихідний сигнал відносного датчика в кожному конкретному випадку трактується по-різному. Прикладом абсолютного датчика є термістор. Його електричний опір безпосередньо залежить від абсолютної температури й вимірюється за шкалою Кельвіна. Термопара є відносним датчиком, оскільки напруга на його виході є функцією градієнта температури на спаї термопари.

Показання абсолютного датчика тиску відповідає значенню тиску, яке не є нульовим. Для того, щоб віднести датчик до тієї або іншої групи, необхідно знати, які величини він може вимірювати, його характеристики, на якому фізичному принципі його реалізовано, який механізм перетворень у ньому застосовано, з якого матеріалу виготовлено, якою є сфера застосування.

Аналізуючи наведені приклади, можна помітити, що датчики використовують різні види енергії додаткового джерела, різні фізичні

принципи дії, крім того, характер змінення їхніх вихідних сигналів може бути різним — неперервним, імпульсним, релейно-імпульсним тощо.

Важливою властивістю датчика є його здатність розрізняти змінення знака або фази вхідного сигналу. За цією властивістю датчики поділяють на *реверсивні* (*двотактні*), у яких знак (фаза) вихідного сигналу змінюється у разі змінення знака вхідного сигналу, і *нереверсивні* (*однотактні*), знак (фаза) вихідного сигналу яких не залежить від полярності вхідного.

Наведена узагальнена класифікація датчиків за багатьма з розглянутих ознак не є вичерпною і при вивченні окремих функціональних елементів може уточнюватися. Будь-яка система контролю й керування об'єктів (технологічних процесів) містить (як функціонально необхідні елементи) один або декілька датчиків (рис. 2.3), які призначено для одержання первинної інформації щодо стану об'єкта контролю й керування. Вимірювальний перетворювач (рис. 2.3, а) являє собою пристрій, що вимірює дійсне значення керованої або контрольованої координати й перетворення цього значення на сигнал, найбільш прийнятний для подальшого його передання через канал керування.

Слід зазначити, що елемент первинної інформації залежно від застосування може виконувати функції вимірювання й перетворення контрольованого параметра одночасно, а може здійснювати тільки перетворення. Так, наприклад, елементи потенціометричного й індуктивного типів, що використовуються для одержання інформації щодо об'єкта, керованою координатою якого є лінійне або кутове переміщення (рис. 2.3, а), потрібно розглядати як датчики, тому що ці елементи виконують функції вимірювання й перетворення керованого параметра одночасно. Те саме можна сказати про ємнісний елемент, який застосовується, наприклад, в системі регулювання концентрації речовини в середовищі.

Сигнал на виході датчика змінюється внаслідок змінення ємності конденсатора, що залежить від концентрації речовини. Однак ці ж елементи автоматики, які використовуються, наприклад, для одержання інформації щодо інших фізичних параметрів керування (тиску, швидкості або прискорення рухомого об'єкта), будуть виконувати тільки функції перетворювача (рис. 2.3, б), оскільки як датчики застосовуються інші чутливі до змінення цих параметрів елементи (мембранні й сильфонні приймачі тиску, акселерометри тощо).

Датчики сигналів можна поділити на два класи: *параметричні й генераторні*. Основою побудови датчиків параметричного типу є властивість змінення деякого параметра чотириполюсника при змінненні його вхідної величини, унаслідок чого вихідна величина чотириполюсника змінюється. Генераторні датчики перетворюють механічну енергію безпосередньо на енергію електричного сигналу керування.

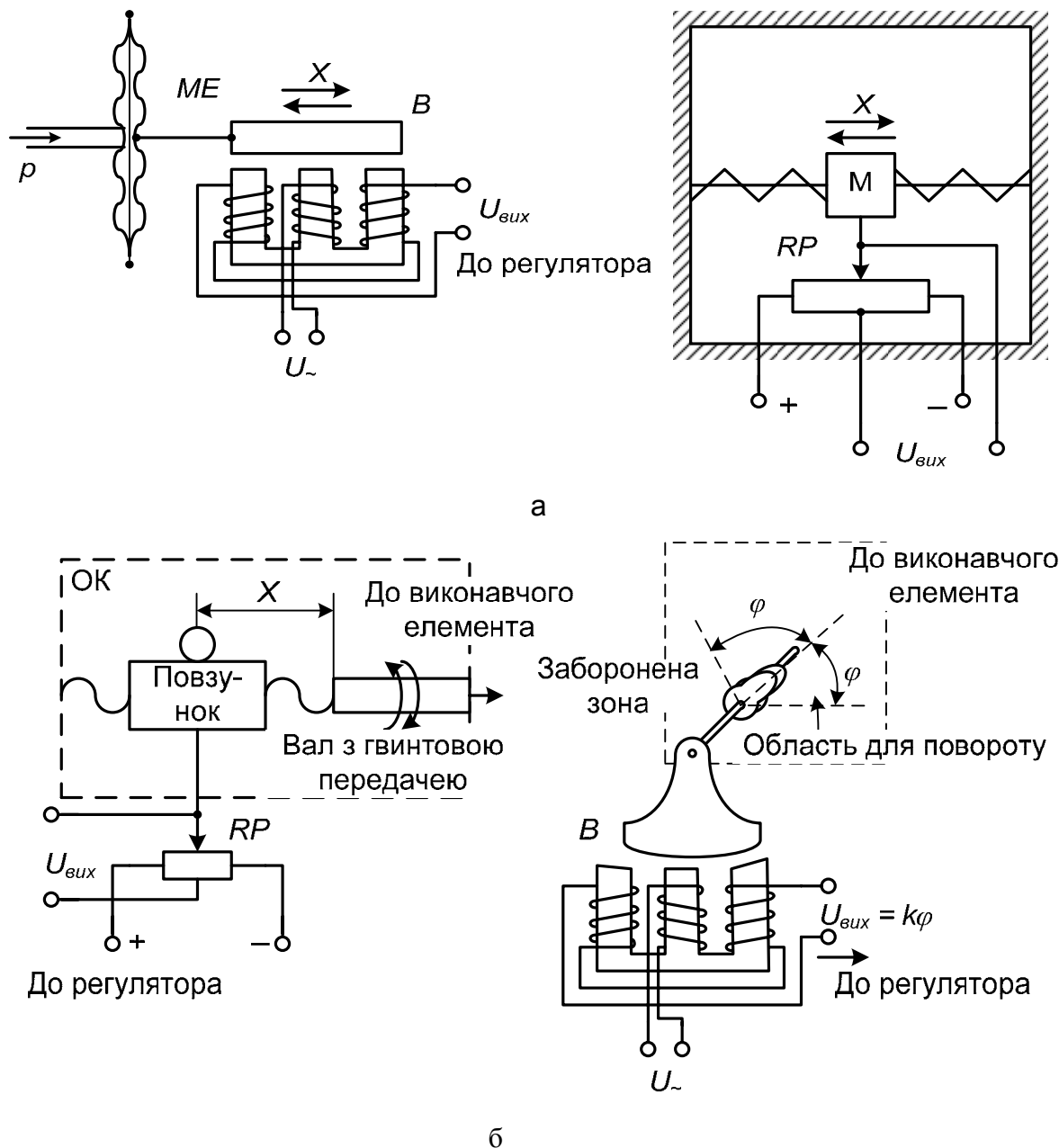


Рис. 2.3. Схеми вмикання потенціометричного й індуктивного датчиків:
 а – виконання функцій вимірювання й перетворення; б – виконання функції перетворення сигналу; ОК – об'єкт керування, ПЕ – потенціометричний елемент; ІЕ – індуктивний елемент; МЕ – мембранний елемент; М – рухома маса акселерометра

За видом вимірюваної (перетворюваної) величини розрізняють датчики положення, швидкості, прискорення, тиску, температури й інших фізичних величин, що є технологічними параметрами, керування якими необхідно здійснювати при автоматизації виробничо-технологічних процесів або об'єктів.

За принципом дії розрізняють датчики опору: *потенціометричні, тензометричні, фоторезисторні й терморезисторні*; датчики індуктивності й взаємодуктивності: *індуктивні, індукційні*; сельсини, мікросини, обертальні трансформатори; магнітоіндукційні, тахогенератори

постійного й змінного струму та ін.

До характеристик датчиків ставлять такі вимоги [3, 6–8, 13, 16, 26, 27, 31, 32]:

- висока динамічна точність, формування сигналу має здійснюватися з мінімальним спотворенням; ця вимога означає, що датчик повинен мати таку передатну функцію, яка в межах смуги пропускання об'єкта контролю й керування зводилася б до постійної величини;

- висока статична точність роботи;

- висока надійність роботи в умовах, передбачених виробничо-технологічною і технічною нормувальною документацією;

- допустимі габарити й маса;

- високий коефіцієнт перетворення, що забезпечує реагування датчика на відносно невеликі неузгодженості між необхідним і дійсним значеннями керованої величини;

- достатня потужність вихідного сигналу.

Для контролю технологічних процесів у КІВ важливими є такі характеристики датчиків [9]: чутливість, короткотермінова й довготривала стабільність, точність, швидкодія, гістерезис, ресурс, вартість, вага, розміри, діапазон вихідних значень, розрізнявальна здатність, вибірковість, лінійність, наявність мертвої зони та її характеристики, формат вихідного сигналу, характеристики у випадках перевантажень.

Відповідно до наведених вимог при вивченні й застосуванні датчиків різних типів необхідно приділяти суттєву увагу таким властивостям: статична характеристика датчика та її вид; чутливість або коефіцієнт перетворення; розрізнявальна здатність; шуми, що генеруються датчиком; потужність вихідного сигналу; потужність вхідного сигналу; динамічні характеристики.

Розглянемо приклади реалізації найбільш поширених груп датчиків (засобів) для контролю технологічних процесів, а саме датчиків для контролю лінійних і кутових переміщень, кутової і лінійної швидкості й прискорення, температури, сили, механічної напруги й дотику, тиску, вологості й вмісту води, світлових випромінювань, температури, хімічних датчиків, датчиків руху й аварійних датчиків.

Сьогодні існує великий асортимент датчиків із вбудованими мікропроцесорами. Такі датчики прийнято називати *інтелектуальними* [7]. Оброблення вимірювань безпосередньо в самому датчику дає змогу покращувати його характеристики. Узагальнену схему інтелектуального датчика показано на рис. 2.4.

Сам датчик знаходиться під керуванням мікропроцесора. Це дає змогу змінювати рівні збудження так, що перемикання датчика між діапазонами вхідних сигналів відбувається автоматично. Крім того, можуть відслідковуватися температура довкілля, відносна вологість, тиск та інші параметри, а також коригування показань датчика з використанням аналогового підсилювача або даних, які зберігаються в мікропроцесорі.

Дуже цінною є можливість мікропроцесорного оброблення – отримання лінійного сигналу від нелінійного датчика з використанням таблиць відповідності, які зберігаються в запам'ятовувальному пристрої мікропроцесора. Це дає змогу створювати датчики з дуже низьким значенням коефіцієнта нелінійності.

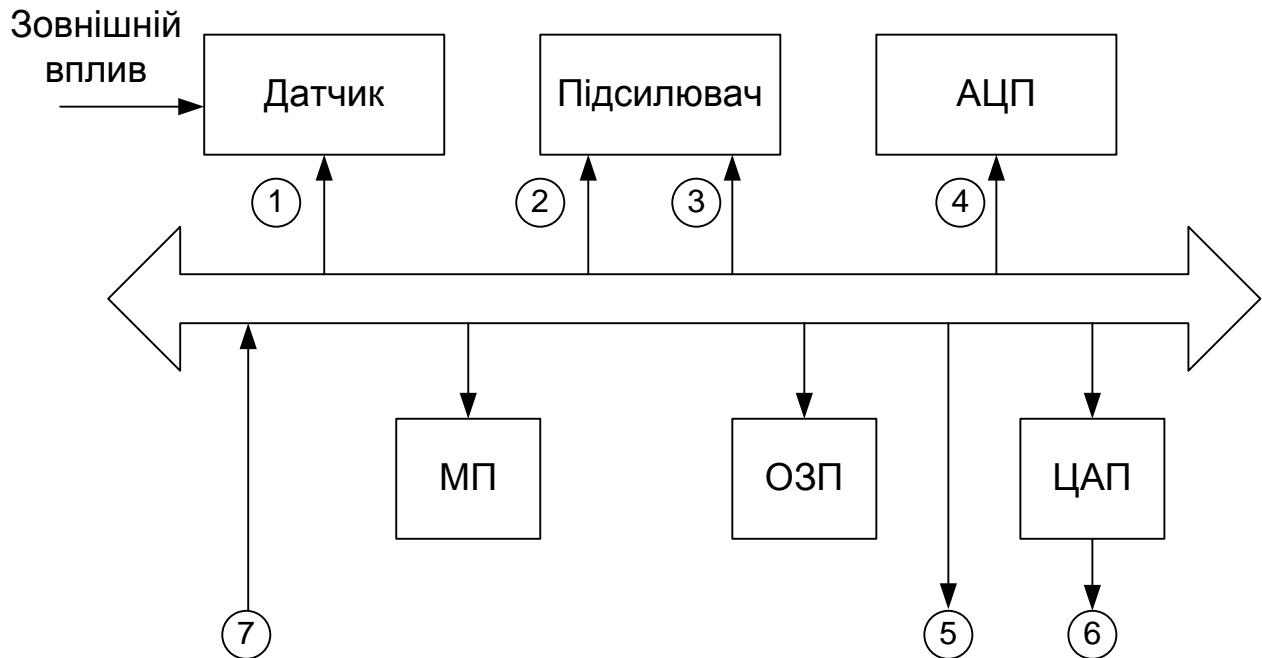


Рис. 2.4. Узагальнена структурна схема інтелектуального датчика

Виходи датчика можуть бути як аналоговими, так і цифровими. Вхід зовнішнього керування дає змогу долучати прилад до складу системи контролю й керування складним об'єктом (технологічним процесом). Такі датчики мають можливість відслідковувати аварійні режими роботи (значення сигналів тривоги, які свідчать про перевищення заданого значення сигналу та можуть оперативно порівнюватися з допусками, що зберігаються в мікропроцесорі.). Окрім того, вбудований запам'ятовувальний пристрій можна використати для протоколювання вимірюваних даних з подальшим переданням протоколу на верхні рівні ієрархії системи контролю й керування.

2.2. Потенціометричні датчики

Потенціометричний датчик, являє собою резистор, величина вихідної напруги якого залежить від розташування струмознімального контакту (рис. 2.5). Потенціометричні датчики призначено для вимірювання лінійних і кутових переміщень і перетворення їх на електричний сигнал, а також для відтворення найпростіших функціональних залежностей в

автоматичних і обчислювальних пристроях неперервного типу. Іноді потенціометр застосовують як перетворювач, для цього його поєднують з яким-небудь чутливим елементом [6].

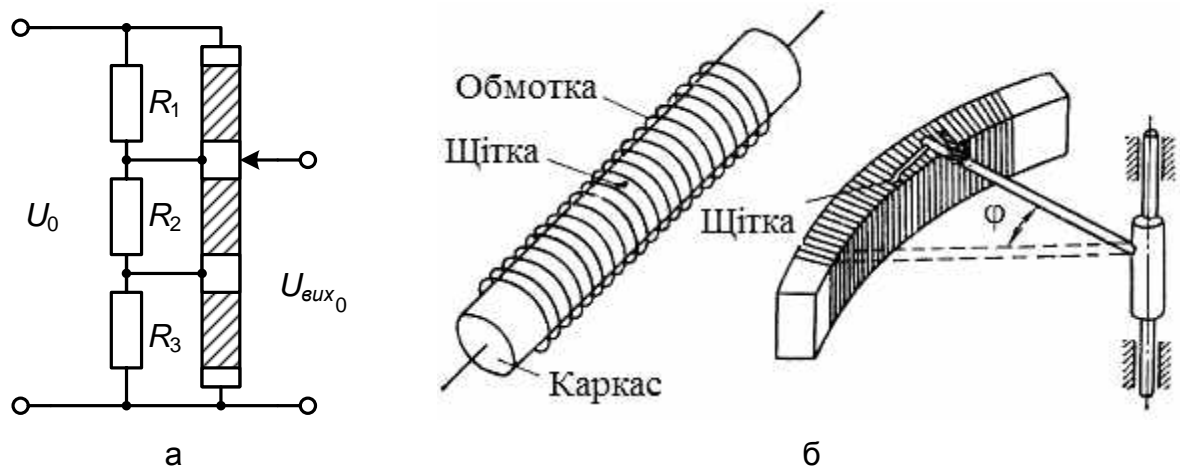


Рис. 2.5. Потенціометричні вимірювальні перетворювачі:
а – ламельний; б – неперервного намотування

За способом виконання резистора потенціометричні датчики підрозділяються на ламельні й неперервного намотування. У ламельних потенціометрах використовуються постійні резистори, що припаюються до ламелей (рис. 2.5, а).

Під час руху струмознімача по контактних ламелях опір змінюється. Потенціометр неперервного намотування складається з каркаса, обмотки й струмознімача (рис. 2.5, б).

Залежно від характеру руху повзунка потенціометри поділяються на датчики лінійного й кутового переміщення (рис. 2.6). Щітка датчика лінійних переміщень робить прямолінійний поступальний рух, а щітка датчика кутового переміщення – круговий рух (рис. 2.6, б).

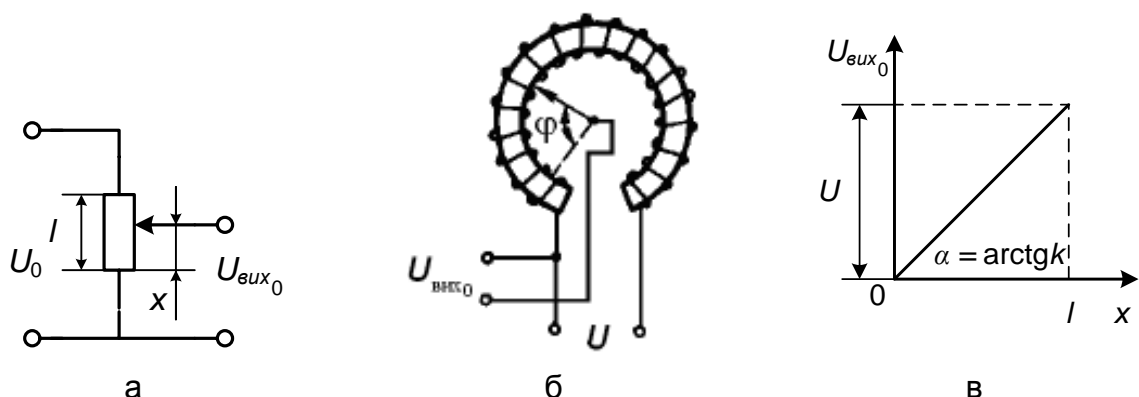


Рис. 2.6. Потенціометричні датчики: а – лінійного переміщення;
б – кутового переміщення; в – статична характеристика датчика

Принцип дії датчика з неперервним намотуванням полягає в такому: до затискачів потенціометра прикладається напруга постійного або

змінного струму незмінної величини. При переміщенні повзунка потенціометра вихідна напруга $U_{вих0}$ змінюється пропорційно до вхідної величини x . Тут переміщення перетворюється на електричну напругу.

Для режиму холостого ходу статична характеристика датчика є лінійною, тому має місце співвідношення

$$U_{вих0} = \frac{U}{R} r, \quad (2.1)$$

де U — напруга живлення потенціометра; R — опір обмотки; r — опір частини обмотки, що припадає на довжину переміщення x движка потенціометра (рис. 2.6, а).

З огляду на те, що $\frac{r}{R} = \frac{x}{l}$, де l — загальна довжина обмотки, одержимо

$$U_{вих0} = \frac{U}{l} x = kx, \quad (2.2)$$

де k — коефіцієнт перетворення потенціометра.

Для потенціометра кутового переміщення за відсутності навантаження

$$U_{вих0} = k\varphi, \quad (2.3)$$

де φ — кут повороту движка від нульового положення (рис. 2.6, б).

З отриманих виразів (2.1) – (2.3) випливає, що статична характеристика за відсутності навантаження є прямою, яка проходить через початок координат, з коефіцієнтом нахилу k (рис. 2.6, в). Наведена статична характеристика дає можливість зробити висновок, що розглянуті потенціометричні датчики не реагують на знак вхідного сигналу, тобто вони належать до класу одноконтурних елементів.

На основі одноконтурних потенціометрів можна побудувати двоконтурні вимірювальні перетворювачі, що реагують на знак вхідного сигналу (рис. 2.7).

Для схем, зображених на рис. 2.7, а, б, статична характеристика є прямою I, а для схем на рис. 2.7, в, г – прямою II (рис. 2.8).

Відмінність характеристик полягає в їх крутизні, яка визначається тим, що при зміні вхідного сигналу він відпрацьовується в схемах між двома повзунками, які відхиляються від нейтрального положення в протилежні боки на величину x . При цьому потенціал точки α зростає на величину U_α ,

потенціал точки β одержує збільшення, що дорівнює за абсолютною величиною збільшенню потенціалу точки α , але є протилежним за знаком.

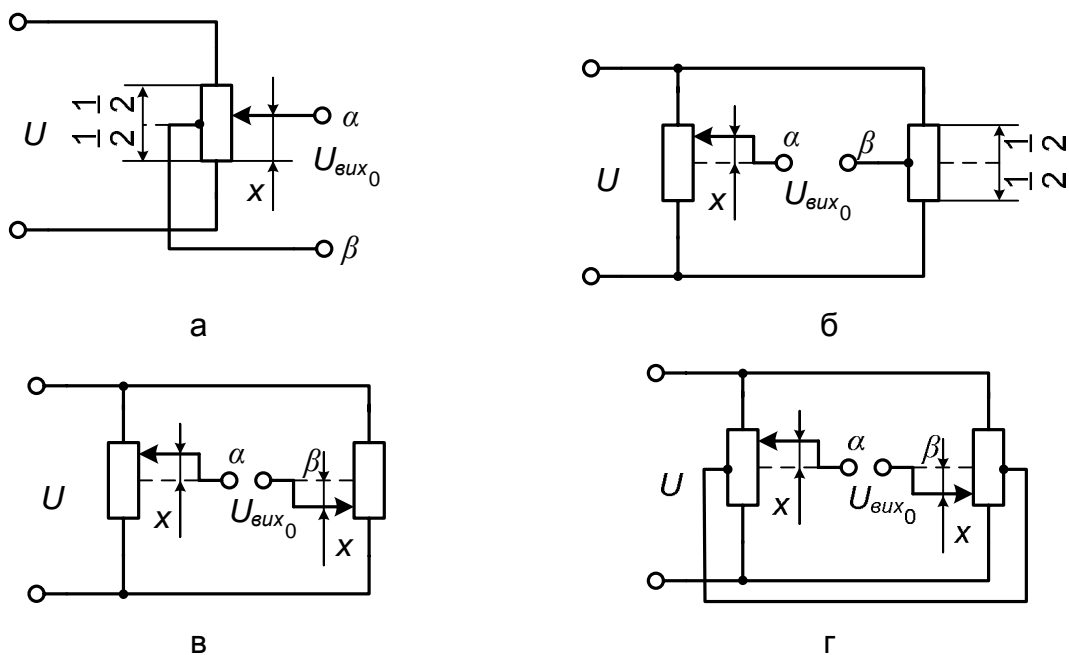


Рис. 2.7. Схеми двотактних потенціометричних вимірювальних перетворювачів

Різниця потенціалів U_α і U_β збільшується вдвічі порівняно зі схемами на рис. 2.7, а, б, де потенціал однієї з точок увесь час залишається незмінним.

Звідси випливає, що перетворювачі з двома повзунками мають при тих самих параметрах потенціометрів удвічі більший коефіцієнт перетворення сигналу порівняно з перетворювачами з одним повзунком. Розглянуті ідеальні характеристики датчиків можуть суттєво відрізнятися від реальних унаслідок похибок, які необхідно враховувати при проектуванні систем контролю й керування.

У підсистемах КІВ крім лінійних потенціометричних датчиків часто застосовуються потенціометри, у яких зв'язок між вхідною й вихідною величинами описується деякою функціональною залежністю вигляду

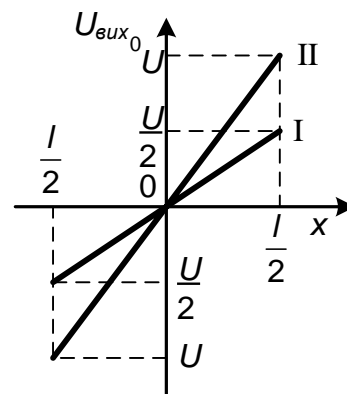


Рис. 2.8. Статичні характеристики двотактних потенціометричних вимірювальних перетворювачів

$$U_{\text{вих}} = \{kx^2; k \ln x; k \sin x; \sqrt{x}, \dots\}. \quad (2.4)$$

Функціональні потенціометричні датчики можна виготовляти з використанням таких способів: змінення діаметра проводу під час намотування; змінення кроку намотування; застосування каркаса певної конфігурації; шунтування ділянок лінійних потенціометрів опорами різної величини. Перші два способи пов'язані з труднощами технологічного характеру, тому частіше застосовують третій і четвертий.

2.3. Індуктивні, трансформаторні і ємнісні датчики

Індуктивні датчики призначено для вимірювання порівняно малих кутових або лінійних механічних переміщень і їх перетворення на електричний сигнал змінного струму. В основу роботи індуктивних датчиків покладено властивість дроселя з повітряним зазором змінювати індуктивність при зміні величини повітряного зазору [3, 6].

Найпростіший індуктивний датчик складається з ярма 1, на якому міститься обмотка 2, і якоря 3, що утримується пружинами (рис. 2.9, а). Ярмо і якор виконуються із шихтованого магнітного матеріалу. Обмотку намотують мідним проводом з малим активним опором.



Рис. 2.9. Електрична схема однопотактного індуктивного датчика (а) і його статична характеристика (б)

Принцип дії однопотактного індуктивного датчика полягає в такому. На обмотку 2 через опір навантаження R_H подається напруга живлення змінного струму з частотою від 50 Гц до декількох кілогерц. Значення струму I , що протікає в колі обмотки, обчислюється таким чином:

$$I = \frac{U_{\sim}}{\sqrt{(R_H + r_D)^2 + (\omega L)^2}}, \quad (2.5)$$

де r_D – активний опір дроселя; ω – частота напруги живлення; L – індуктивність обмотки датчика.

Оскільки активний опір $R = R_n + r_d$ є сталою величиною, то струм I може змінюватися тільки внаслідок змінення індуктивної складової опору

$$x_L = \omega L,$$

яка зі свого боку залежить від величини повітряного зазору δ .

Таким чином, кожному значенню зазору δ відповідає цілком певне значення струму I , що створює падіння напруги на резисторі R_n

$$U_{вух} = IR_n, \quad (2.6)$$

яке є вихідним сигналом датчика.

Зв'язок між вхідним сигналом і переміщенням δ , вихідним сигналом і електричною напругою $U_{вух}$ визначається статичною характеристикою

$$U_{вух} = f(\delta). \quad (2.7)$$

Аналітичний вираз функції (2.11) можна одержати, установлюючи зв'язок між індуктивністю L і величиною зазору δ . Будемо вважати повітряний зазор досить малим. Тоді потоками розсіювання можна знехтувати і знайти величину потокозчеплення:

$$\Psi = \Phi W, \quad (2.8)$$

де Φ – магнітний потік, який створюється обмоткою;

W – кількість витків обмотки.

З іншого боку,

$$\Psi = LI. \quad (2.9)$$

Порівнюючи (2.12) і (2.13), одержимо

$$L = \Phi W/I. \quad (2.10)$$

Магнітний потік Φ прямо пропорційний силі намагнічування й обернено пропорційний магнітному опору:

$$\Phi = \frac{F}{R_{м.з} + R_m}.$$

Тут $R_{м.з}$ – магнітний опір зазору; R_0 – магнітний опір заліза.

Сила намагнічування $F = IW$, а магнітний опір зазору набагато більший за магнітний опір заліза:

$$L = \frac{0,4\pi W^2}{2\delta} \frac{10^{-8}}{\mu_0 S}, \quad (2.11)$$

де μ_0 – магнітна проникність повітря; S – площа поперечного перерізу магнітопроводу.

Ураховуючи (2.11) і послідовно підставляючи значення L в (2.17) і (2.8), одержимо [6]

$$U_{вих} = \frac{U_{\sim} R_H}{\sqrt{(R_H + r_D)^2 + \left(\frac{0,4\pi\mu_0 S W^2 \omega}{2\delta} 10^{-8} \right)^2}}. \quad (2.12)$$

В існуючих датчиках активний опір обмотки r_D , а також опір навантаження набагато менші за індуктивний опір, тому

$$U_{вих} \approx \frac{2U_{\sim} R_H 10^8}{0,4\pi\mu_0 S W^2 \omega} \delta = k\delta. \quad (2.13)$$

Таким чином, напруга на виході датчика при змінненні величини зазору змінюється за лінійним законом, тобто статична характеристика являє собою пряму, що проходить через початок координат під кутом нахилу $\alpha = \arctg k$ до осі абсцис (це – ідеальна статична характеристика). Реальну характеристику перетворювача показано на рис. 2.9, б суцільною лінією.

Існують дві основні схеми ввімкнення двотактних індуктивних датчиків: диференційна й мостова. Розглянемо диференційну схему. У схемі вмикання індуктивного вимірювального перетворювача припускається наявність трансформатора із середньою точкою (рис. 2.10).

Обидві обмотки датчика мають однакову кількість витків W . Осердя обмоток є ідентичними за своїми характеристиками. Опір навантаження розташовується між середніми точками обмоток трансформатора й вимірювального перетворювача. Струм, що протікає через опір навантаження, дорівнює різниці струмів правої і лівої половин схеми:

$$I_{вих} = I_1 - I_2, \quad (2.14)$$

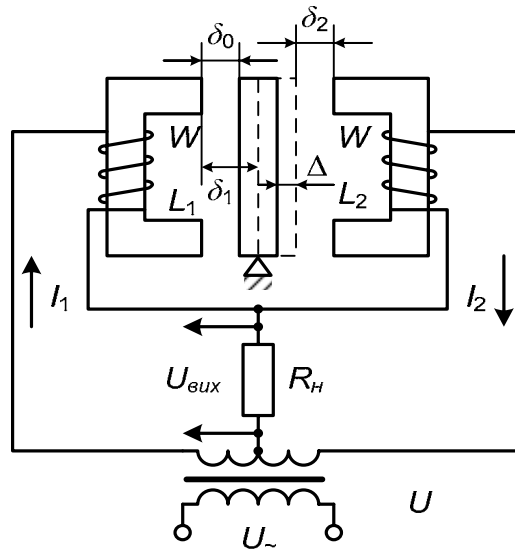


Рис. 2.10. Диференційна схема двотактного індуктивного датчика

Тоді індуктивності кожної половини датчика, обумовлені величиною зазорів, будуть однаковими ($L_1 = L_2 = L_0$). Отже, струми I_1 і I_2 дорівнюють один одному, але протилежні за фазою, а струм навантаження згідно з (2.18) дорівнює нулю. Це означає, що напруги на виході датчика немає.

Таким чином, двотактний індуктивний датчик забезпечує рівність нулю вихідного сигналу ($U_{вих} = 0$) при нульовому сигналі на вході ($\Delta = 0$). При переміщенні якоря на величину Δ ширина кожного із зазорів змінюється: один збільшується, а другий зменшується на ту саму величину: $\Delta_1 = \delta_0 + \Delta$; $\delta_2 = \delta_0 - \Delta$.

Це приводить до змінення індуктивностей, тому що магнітний опір першого зазору збільшується, а другого – зменшується, що відповідає зменшенню значення індуктивності L_1 і збільшенню значення індуктивності L_2 . При невеликих переміщеннях індуктивність змінюється майже за лінійним законом. На рис. 2.11 зображено графік залежності $L = f(\Delta)$ для обох половин індуктивного датчика.

Відповідно до графіка $L_1 = L_0 - \Delta L$; $L_2 = L_0 + \Delta L$. Змінення індуктивностей L_1 і L_2 призведе до порушення балансу струмів: струм I_1 збільшиться, а I_2 — зменшиться. У навантаженні потече результуючий струм, що створює вихідну напругу. При змінненні напрямку переміщення якоря фаза вихідної напруги зміниться на 180° відносно

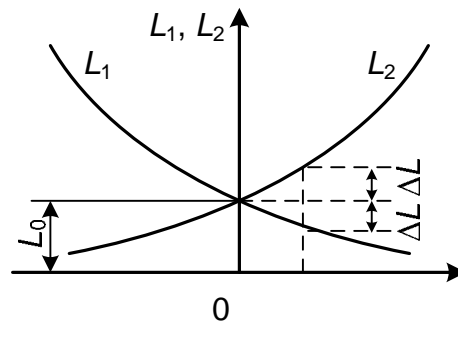


Рис. 2.11. Залежність індуктивності електричного плеча датчика від величини зазору δ

напруги опорного живлення.

Трансформаторні індуктивні датчики призначено для виміру координат розміщення об'єктів. Принцип дії трансформаторних індуктивних датчиків ґрунтується на використанні зміни взаємної індуктивності між обмотками під час переміщення якоря (рис. 2.12). Обмотки кола живлення W_1 і W_2 вмикаються зустрічно й мають однакову кількість витків, тобто $W_1 = W_2 = W$. Отже, магнітні потоки Φ_1 і Φ_2 , що створюються струмом в цих обмотках, будуть спрямовані в середньому осерді назустріч один одному, а вихідна напруга визначиться як

$$U_{вих} = 4,44 f W_0 (\Phi_1 - \Phi_2), \quad (2.15)$$

де f — частота напруги живлення; W_0 — кількість витків обмотки середнього осердя.

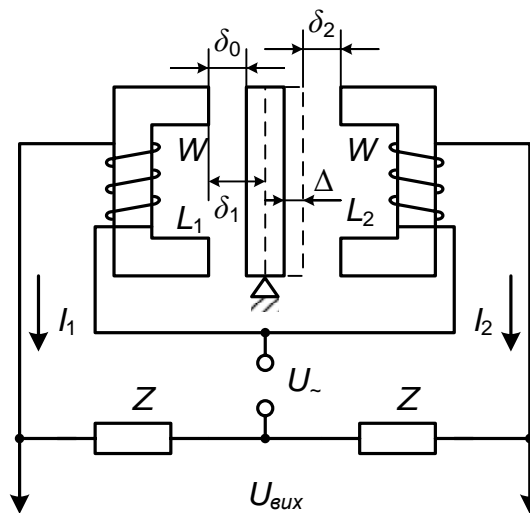


Рис. 2.12. Трансформаторний індукційний датчик

Потоки Φ_1 і Φ_2 є пропорційними до індуктивностей відповідних обмоток:

$$\Phi_1 = \frac{L_1 I}{W}; \quad \Phi_2 = \frac{L_2 I}{W}. \quad (2.16)$$

Зазор δ_0 є постійним, тому на величину індуктивності впливає тільки площа перекриття осердя S , що змінюється під час переміщення якоря.

Таким чином, у нейтральному положенні ($\Delta = 0$) площі перекриття S_1 і S_2 дорівнюють одна одній, що приводить до рівності потоків Φ_1 і Φ_2 , а отже, $U_{вих} = 0$.

Під час переміщення якоря на величину Δ відбувається змінення площ

перекриття крайніх осердь на ΔS . Тоді на основі (2.15) і (2.16) має місце співвідношення:

$$\Phi_1 = \frac{0,4\pi\mu_0 W I 10^8}{\delta_0} (S_0 + \Delta S), \quad \Phi_2 = \frac{0,4\pi\mu_0 W I 10^8}{\delta_0} (S_0 + \Delta S),$$

а відповідно до рівняння (2.15) вихідна напруга датчика

$$U_{\text{вих}} = k_1 \Delta S.$$

Залежність $U_{\text{вих}}$ від Δ показано на рис. 2.13.

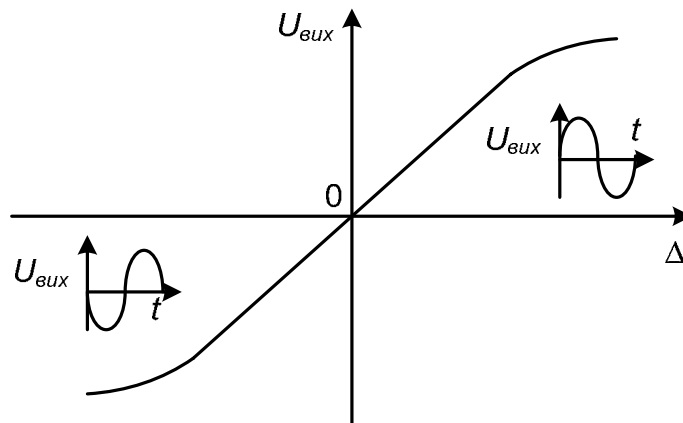


Рис. 2.13. Статична характеристика трансформаторного індукційного вимірювального перетворювача

З огляду на те, що збільшення площі ΔS є пропорційним переміщенню якоря Δ ,

$$U_{\text{вих}} = k \Delta. \quad (2.17)$$

Таким чином, статична характеристика трансформаторного індуктивного вимірювального перетворювача у робочому діапазоні є лінійною залежністю.

Динамічні властивості індуктивних датчиків визначають, виходячи з умов їхньої роботи. Зазвичай механічні переміщення, що являють собою вхідний сигнал датчика, мають більш низьку частоту порівняно з частотою живильної напруги. Тому змінення амплітуди вихідної напруги з достатньою точністю визначається рівнянням сталого режиму (2.21). Отже, кожний з розглянутих індуктивних вимірювальних перетворювачів можна вважати безінерційною ланкою з передавальною функцією

$$W(p) = \frac{U(p)}{\Delta(p)} = k \quad (2.18)$$

і для опису застосовувати всі динамічні характеристики підсилювальної ланки з урахуванням реально існуючого робочого діапазону частот датчика. Коли діапазон вимірюваних переміщень регульованої координати охоплює ділянки насичення, лінійна залежність індуктивного датчика є неприйнятною, тому що не враховуються частотні спотворення сигналу, внесені цим елементом. У цьому випадку можна скористатися еквівалентним комплексним коефіцієнтом передачі, обчисливши коефіцієнти гармонійної лінеаризації.

Ємнісні датчики є конденсаторами, у яких змінення відстані між пластинами, площі перекриття пластин або діелектричної проникності діелектрика, поміщеного між пластинами, впливає на змінення ємності.

Ємнісні датчики залежно від вибраної класифікаційної ознаки можна поділити на такі групи:

1) за призначенням ємнісного датчика — лінійного й кутового переміщення, рівня й лінійних розмірів, температури, зусиль;

2) за конструктивним виконанням — із плоско-паралельними пластинами конденсатора, з циліндричною формою конденсатора, з діелектриком між пластинами, без діелектрика;

3) за видом змінюваного параметра конденсатора — зі змінюваною площею перекриття пластин, зі змінюваним зазором між обкладками конденсатора, зі змінюваною діелектричною проникністю.

Ємнісні датчики працюють на змінному струмі. Принцип їхньої дії базується на змінненні ємності конденсатора. Під впливом контрольованої координати керованого об'єкта його ємність обумовлена співвідношенням

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{\delta}, \quad (2.19)$$

де ε — відносна діелектрична проникність діелектрика;

S — площа пластини;

δ — зазор між пластинами;

$\varepsilon_0 = \frac{1}{6\pi \cdot 10^9}$ — діелектрична проникність вакууму, м⁻¹.

Як видно з виразу, на ємність конденсатора можна впливати зміненням зазору δ між пластинами (рис. 2.14, а), площі перекриття S пластин (рис. 2.14, б), діелектричної проникності ε речовини, що знаходиться в проміжку між обкладками конденсатора (рис. 2.14, в).

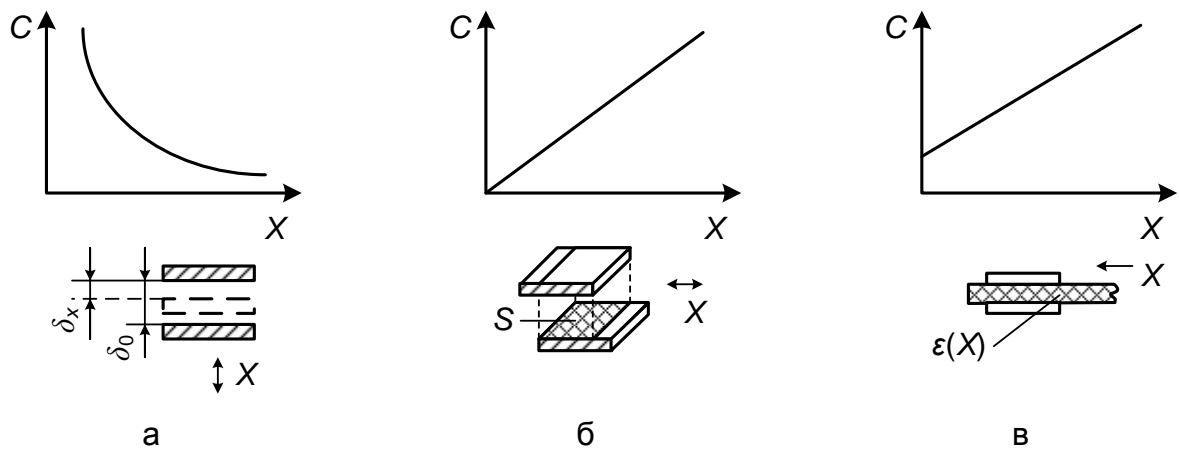


Рис. 2.14. Графіки змінення ємності при змінненні параметрів перетворювача

У цьому випадку ємність вимірювального перетворювача

$$C(\varphi) = \frac{\varepsilon\varepsilon_0(r_2^2 - r_1^2)}{2\delta_0}(\varphi - \varphi_0). \quad (2.20)$$

Усі величини у виразі є сталими, окрім вимірюваної змінної φ , тому $C = k\varphi$. Отже, статична характеристика такого ємнісного датчика буде лінійною.

Вибір того або іншого параметра конденсатора як змінюваної величини залежить від характеру вимірюваної величини. Так, при вимірюванні кутових переміщень найбільш зручно використовувати як змінюваний параметр площу перекриття пластин (рис. 2.15).

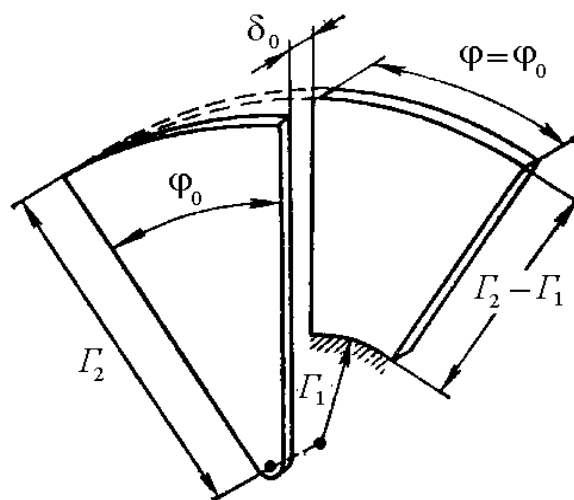


Рис. 2.15. Ємнісний датчик кутового переміщення

При оцінюванні лінійного переміщення як змінюваний параметр конденсатора можна вибрати величину δ , тоді

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{\delta_x}, \quad (2.21)$$

а статична характеристика датчика буде нелінійною. У зв'язку з цим такі датчики слід застосовувати в тих випадках, коли діапазон змінення контрольованої величини відповідає порівняно невеликій ділянці характеристики, на якій її можна вважати лінійною.

При вимірюванні порівняно великих лінійних переміщень доцільно використовувати як змінюваний параметр конденсатора площу перекриття пластин.

Однак розглянуті схеми ємнісних датчиків не мають властивості реверсивності. Подолання цього недоліку здійснюється шляхом застосування мостових схем вмикання двотактних ємнісних датчиків (рис. 2.16, а). Відповідно до (2.22) ємність кожного плеча такого ємнісного датчика становитиме:

$$C_1 = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{\delta_1}; \quad C_2 = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{\delta_2},$$

де δ_1 і δ_2 – величини зазорів для нижньої і верхньої частин схеми відповідно.

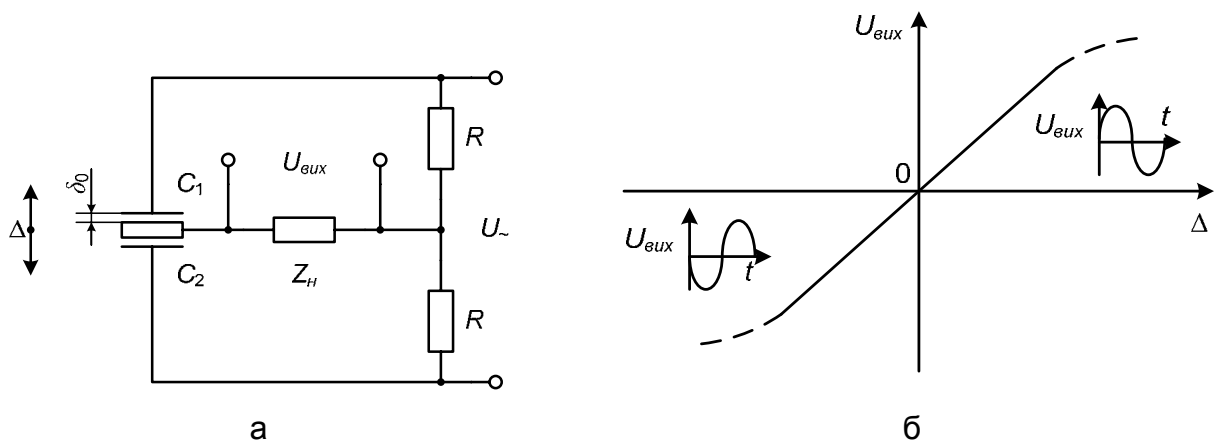


Рис. 2.16. Електрична схема двотактного ємнісного датчика (а) і його статична характеристика (б)

При переміщенні $\Delta = 0$ ємності C_1 і C_2 мають однакові значення: $C_1 = C_2 = C_0$. Якщо $\Delta \neq 0$, то відбувається змінення ємностей:

$$C_1 = \frac{C_0}{1 + \frac{\Delta}{\delta_0}}; \quad C_2 = \frac{C_0}{1 - \frac{\Delta}{\delta_0}}.$$

Вихідна напруга мостової схеми

$$U_{\text{вих}} = \frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1} \frac{U}{2} = \frac{U}{2\delta_0} \Delta = k\Delta.$$

Отже, статична характеристика двотактного ємнісного датчика являє собою лінійну функцію (рис. 2.16, б). При зміненні напрямку переміщення середньої пластини фаза вихідного сигналу змінюється на 180° відносно фази напруги живлення датчика, що є опорною напругою.

Слід зазначити, що підімкнення навантаження призводить до спотворення лінійності, однак при малих значеннях Δ характеристику з достатнім ступенем точності можна вважати лінійною.

В основу роботи ємнісних перетворювачів для вимірювання таких фізичних параметрів, як лінійні розміри, концентрація речовини, температура, зусилля, покладено залежність діелектричної проникності від вимірюваного параметра, наприклад, при зміненні вологості проникність повітряного зазору між обкладинками змінюється. Діелектрична проникність більшості діелектриків не залишається постійною і при зміненні температури, причому їхній температурний коефіцієнт можна вважати досить високим.

Увімкнення ємнісних датчиків зі змінюваною діелектричною проникністю здійснюється за мостовою або диференціальною схемою. Для збільшення чутливості датчика застосовується паралельне увімкнення обкладинок конденсаторів, для яких створюються однакові умови. При вимірюванні концентрації датчики розміщують у відповідному середовищі.

Перевагами ємнісних датчиків є висока чутливість, велика роздільна здатність при малих значеннях вхідного сигналу, простота конструкції, невеликі габарити й маса, незначна величина притягальної сили між пластинами конденсатора, яку необхідно пересилювати під час переміщення рухомих пластин. Ємнісні вимірювальні перетворювачі є майже безінерційними елементами з передатною функцією $W(p) = k$, оскільки частота напруги живлення датчика на два і більше порядків перевищує частоту вхідного вимірюваного сигналу.

До недоліків ємнісних датчиків слід віднести порівняно низький рівень потужності вихідного сигналу, нестабільність характеристик при зміненні параметрів середовища, вплив паразитних ємностей. Для зменшення втрат потужності вихідного сигналу необхідно узгодити навантаження з внутрішнім опором схеми.

2.4. Датчики швидкостей і прискорень

Швидкість і прискорення — це динамічні характеристики об'єкта. Переміщення об'єкта, його швидкість і прискорення є взаємозв'язаними фізичними величинами: швидкість — це перша похідна від переміщення, прискорення — друга.

Швидкість руху може бути лінійною або кутовою. Її значення свідчить про те, наскільки швидко об'єкт рухається прямою лінією або наскільки швидко він обертається. Швидкість залежить від розмірів об'єкта і вимірюється, наприклад, в міліметрах за секунду (мм/с) або кілометрах за годину (км/год). Принцип дії таких датчиків часто ґрунтується на вимірюванні переміщення об'єкта відносно деякого еталонного об'єкта, який часто належить до складу самого датчика [3, 6]. Тому чутливий елемент, що реагує на переміщення об'єкта, є одним із компонентів багатьох датчиків швидкості й прискорень. Іноді таких елементів у складі датчиків швидкості й прискорень немає, оскільки вони самі перетворюють характеристики руху на електричні сигнали. Наприклад, відповідно до закону Фарадея (закон електромагнітної індукції), магніт, який рухається в котушці індуктивності, приводить до виникнення в ній електрорушійної сили (ерс). Значення індукованої ерс є пропорційним до значення швидкості руху магніту і до значення магнітної індукції. Лінійні датчики швидкості побудовано за цим законом. До складу датчика входять постійний магніт і котушка індуктивності певної форми. Вихідна напруга (ерс) на котушці прямо пропорційна до відносної швидкості руху магніта в межах робочої зони.

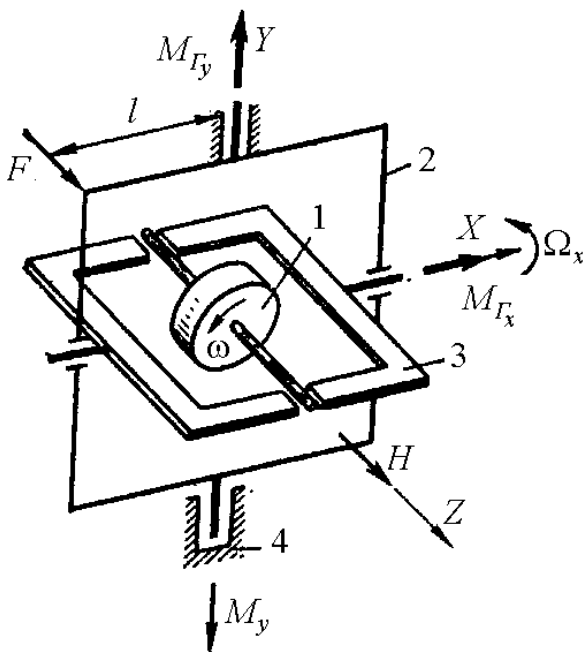


Рис. 2.17. Триступеневий гіроскоп

Датчики лінійної швидкості вимірюють значення на відстані, обмеженій їхніми розмірами, тому їх використовують в основному для вимірювання швидкості вібрацій. Датчики кутової швидкості, які працюють за цим же принципом, безперервно вимірюють швидкість обертання і мають необмежену кількість обертів.

Для вимірювання лінійних і кутових швидкостей і прискорень зазвичай використовують гіроскопи й акселерометри [3, 6, 7]. Гіроскопічні датчики (рис. 2.17) призначено для вимірювання кутових координат, кутових швидкостей і прискорень об'єктів, що рухаються, відносно їхніх осей, а також у системах стабілізації

[1, 6, 7, 10]. Гіроскоп являє собою симетричне тіло, закріплене в

карданному підвісі, яке швидко обертається навколо своєї осі. Це дає йому можливість змінювати своє положення щодо нерухомої основи.

Гіроскоп складається із зовнішньої рамки 2, внутрішньої рамки 3, ротора 1 і основи 4. Ротор гіроскопа, закріплений у підшипниках внутрішньої рамки, має три ступеня свободи і може незалежно обертатись навколо головної осі z , яка має назву осі власного обертання гіроскопа, обертатися разом із внутрішньою рамкою відносно осі x , а також разом із внутрішньою і зовнішньою рамками відносно осі y . Такий гіроскоп називають триступеневим. Ротор гіроскопа приводять в обертання електричною або пневматичною енергією. Гіромотор (електричний гіроскоп) змінного струму має особливе конструктивне виконання. Він являє собою трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, причому ротор гіромотора розташовано зовні, а статор з обмотками збудження – усередині.

Триступеневий гіроскоп, який не має ніяких моментів зовнішніх сил відносно осей підвісу (моменти тертя в підшипниках, моменти відведення струму й ін.), називають *вільним* (рис. 2.18). Якщо немає моментів зовнішніх сил, то не буде й прецесії гіроскопа, отже головна вісь гіроскопа буде зберігати незмінним свій напрямок у просторі.

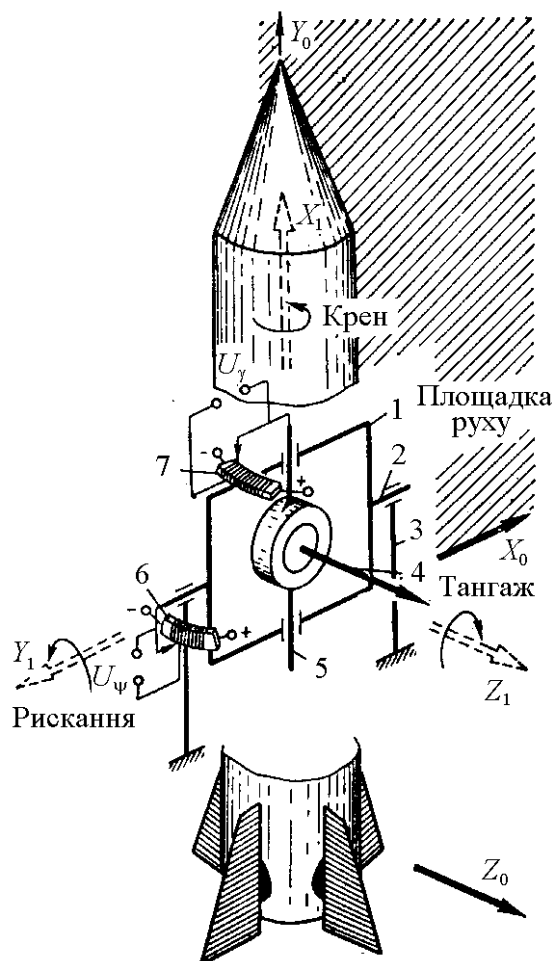


Рис. 2.18. Схема використання триступеневого гіроскопічного вимірювача з потенціометричними перетворювачами

Ця основна властивість вільного гіроскопа дає можливість застосовувати його для вимірювання кутових координат об'єктів, що рухаються. З допомогою одного триступеневого гіроскопа можна вимірювати дві кутові координати (див. рис. 2.18). Для цього використовують два потенціометричні датчики поворотного типу, що встановлюються таким чином: основу потенціометра 6 жорстко закріплюють на об'єкті 3, а його струмознімач — на осі зовнішньої рамки 2, цей перетворювач видає напругу, що є пропорційною куту рискання ψ (повороту об'єкта відносно осі Y_1); основа потенціометра 7 устанавлюється на зовнішній рамці 1, а його струмознімач — на осі внутрішньої рамки 5. З цього перетворювача знімається напруга, яка є пропорційною куту крену γ (поворот навколо подовжньої осі X_1).

У вихідному положенні струмознімачі знаходяться в середніх точках потенціометрів, і сигналу на виході перетворювачів немає. Під час руху при коливаннях транспортного засобу за рисканням відбувається його поворот навколо осі Y_1 , при цьому основа гіроскопа повертається навколо осі своєї зовнішньої рамки на такий самий кут ψ .

Вектор H і площина зовнішньої рамки залишаються нерухомими. Оскільки основа потенціометра 6 жорстко зв'язана з корпусом транспортного засобу, вона буде повертатися відносно нерухомого струмознімача, отже, на виході потенціометричного перетворювача буде зніматися сигнал U_ψ , пропорційний куту рискання ψ .

При коливаннях транспортного засобу за креном відбувається його поворот відносно осі X_1 на кут γ . Разом з корпусом засобу повертаються основа гіроскопа і його зовнішня рамка на такий самий кут навколо осі підвісу гіромотора (осі внутрішньої рамки). Вектор H і гіромотор при цьому залишаються нерухомими.

Отже, жорстко закріплена на зовнішній рамці основа потенціометра 7 переміститься разом з нею відносно нерухомого струмознімача, жорстко зв'язаного з віссю внутрішньої рамки. Таким чином, на виході потенціометричного перетворювача буде зніматися сигнал, пропорційний куту крену γ .

Коливання транспортного засобу за тангажем (відносно осі Z_1) і його поворот у площині руху не створюють ніяких відносних переміщень елементів гіроприладу, тому що цей рух відбувається навколо осі Z_1 , що є рівнобіжною вектору кінетичного моменту H .

Гіроскоп із трьома ступенями свободи і достатнім ступенем точності можна взяти за безінерційну (підсилювальну) ланку з передавальною функцією

$$W(p) = k,$$

де k — коефіцієнт перетворення гіроскопа.

Акселерометр (датчик прискорень) являє собою пристрій для вимірювання лінійного або кутового прискорення й використовує інерційні властивості маси вільно підвішеного вантажу.

Датчик лінійних прискорень (рис. 2.19, а) складається з тягара масою m , пружин 1 і 2, потенціометра 3. Тягар масою m підвішується до рухомого об'єкта з допомогою пружин так, щоб вісь x акселерометра розташовувалася паралельно до тієї осі, прискорення координат якої необхідно виміряти.

Тоді при виникненні прискорення об'єкта інерційна сила тягара $m \frac{d^2 x_0}{dt^2}$, переборюючи силу пружності пружин і в'язкості середовища, буде переміщувати тягар масою m по координаті x із прискоренням $m \frac{d^2 x}{dt^2}$, а разом з ним і струмознімач відносно середньої точки основи потенціометра.

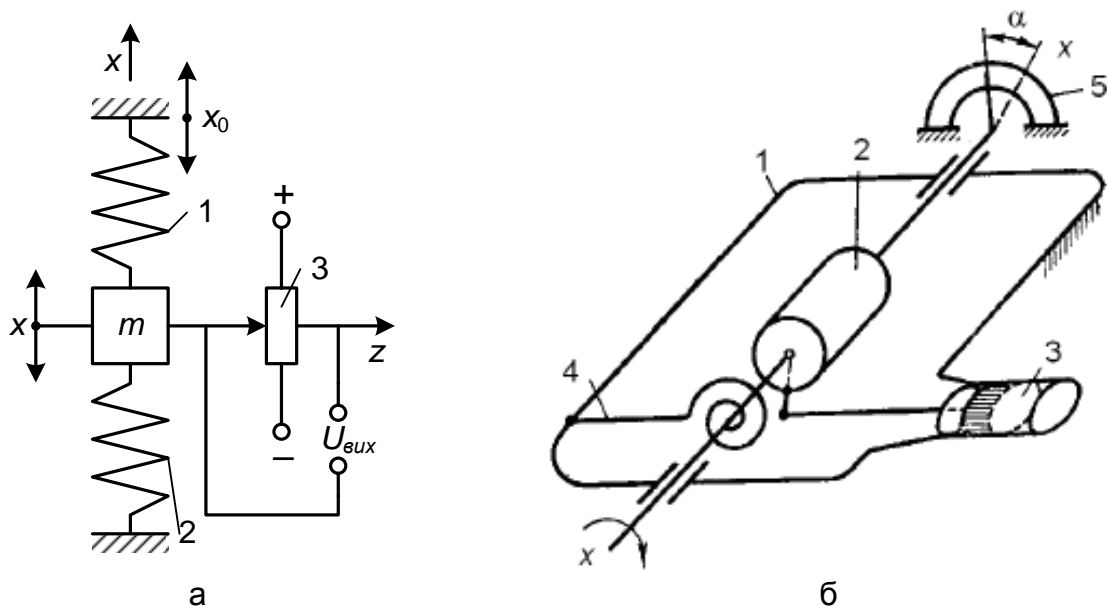


Рис. 2.19. Схеми акселерометрів: а – для вимірювання лінійних прискорень; б – для вимірювання кутових прискорень

При цьому величина переміщення є пропорційною прискоренню об'єкта по певній координаті. Рух тягара масою m , який підвішено на пружному носії у в'язкому середовищі, описується за законом рівності сил

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + k_a \frac{dx}{dt} + cx = m \frac{d^2 x_0}{dt^2} .$$

Тут x_0 — лінійне переміщення об'єкта в місці установаження акселерометра в напрямку вимірювальної осі; x — переміщення тягара масою m відносно об'єкта; k_a — коефіцієнт демпфірування, що залежить від середовища, у якому знаходиться маса приладу; c — коефіцієнт пружності пружин; $m \frac{d^2 x}{dt^2} = ma$ — сила інерції, що діє на тягар приладу (a — лінійне прискорення).

Увівши $T = \sqrt{\frac{m}{c}}$, $2\xi T = \frac{k_D}{c}$, запишемо передавальну функцію акселерометра у вигляді

$$W(p) = \frac{\alpha(p)}{\varphi(p)} = \frac{K}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}, \quad (2.22)$$

де K — коефіцієнт перетворення приладу.

Цей вираз є передавальною функцією коливальної ланки. Отже, акселерометр буде досить точно відтворювати прискорення об'єкта, що повільно змінюється.

Пружинні акселерометри, призначені для виміру кутових прискорень, мають тільки один ступінь свободи — обертальний рух відносно вимірюваної осі x (рис. 2.19, б). Рамка 1 вимірюваного елемента жорстко закріплюється на корпусі транспортного засобу так, що вісь обертання x інерційної маси 2 збігається з віссю об'єкта керування, щодо якої потрібно робити вимір кутового прискорення обертання.

З появою прискорення \ddot{u} транспортного засобу щодо вимірюваної осі створюється момент інерційних сил

$$M_{ин} = J \ddot{u},$$

де J — момент інерції маси відносно осі x .

Інерційний момент врівноважується моментом пружних сил пружини 4

$$M_{упр} = c\alpha,$$

демпфуючим моментом, обумовленим наявністю демпфера 3,

$$M_D = K_D \frac{d\alpha}{dt}$$

і інерційним моментом, що виникає внаслідок появи відносного кутового прискорення $\frac{d^2 \alpha}{dt^2}$

$$M_{jB} = J \frac{d^2 \alpha}{dt^2}.$$

Тоді рівняння руху рухливої системи акселерометра кутових переміщень запишеться у формі

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + K_D \frac{d\alpha}{dt} + c\alpha = J \frac{d^2 \psi}{dt^2},$$

а передавальна функція набуде вигляду (2.22).

У сталому режимі складові $J \frac{d^2 \alpha}{dt^2}$ і $K_D \frac{d\alpha}{dt}$ перетворюються на нуль, тому що рух маси припиняється. Отже

$$J \frac{d^2 \psi}{dt^2} = c\alpha.$$

Звідси

$$\alpha = \frac{J}{c} \psi,$$

тобто кут повороту маси в сталому режимі є пропорційним кутовому прискоренню об'єкта вздовж вимірюваної осі.

Інерційна маса, повертаючись разом з віссю на кут α , захоплює за собою струмознімач потенціометричного перетворювача 5. Таким чином, сигнал на виході потенціометра буде пропорційним куту α , а отже, і кутовому прискоренню ψ .

Для зменшення похибок акселерометрів необхідно забезпечувати таку конструкцію підвісу тягара, щоб момент тертя і люфт були мінімальними. Істотно знизити поріг чутливості вдається завдяки застосуванню поплавкових акселерометрів, маятник (масу) яких розміщено всередині поплатілого циліндричного поплавця, зануреного в рідину.

В основі роботи індуктивних датчиків частоти обертання лежить явище електромагнітної індукції. Датчики виконано у вигляді котушок 2 індуктивності з магнітними осердями 3 (рис. 2.20).

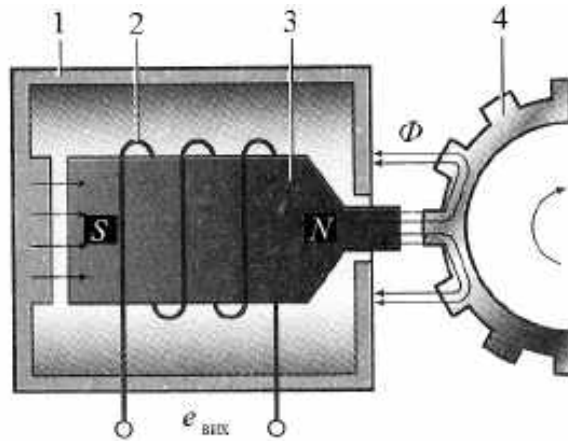


Рис. 2.20. Принцип дії датчика частоти обертання: 1 – магнітопровід; 2 – котушка індуктивності; 3 – магнітне осердя; 4 – феромагнітний диск; Φ – магнітний потік; $e_{\text{вих}}$ – вихідний електричний сигнал

При проходженні під осердям 3 зубця феромагнітного диска 4 (наприклад, зубця маховика) магнітний потік Φ датчика змінюється і в котушці 2 індукується сигнал (електрорушійна сила $e_{\text{вих}}$). Амплітуда сигналу, що індукується, залежить від частоти обертання об'єкта (наприклад, колінчатого вала) і зазору між сердечником і зубцем маховика.

У датчиках електронних спідометрів для вимірювання швидкості використовується ефект Холла, суть якого пояснюється на рис. 2.21.

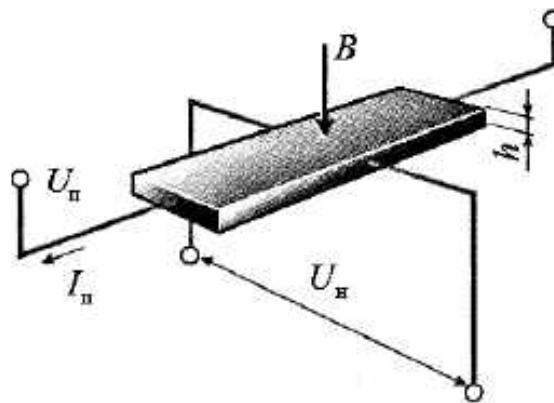


Рис. 2.21. Пояснення ефекту Холла

Якщо до провідника або напівпровідника прикладено напругу живлення $U_{\text{ж}}$ і під прямим кутом на нього діє магнітне поле індукцією B , то виникає напруга Холла $U_{\text{н}}$, яка є перпендикулярною до напрямку струму від джерела живлення $I_{\text{ж}}$ і до напрямку магнітного поля:

$$U_{\text{н}} = K_{\text{н}} I_{\text{ж}} B / h, \quad (2.23)$$

де K_H – стала Холла;

I – струм від джерела живлення;

B – магнітна індукція;

h – товщина провідника (напівпровідника).

З виразу (2.23) випливає, що величина напруги U_H є пропорційною до значення магнітної індукції B . Якщо магнітне поле з індукцією B змінювати з частотою, пропорційною до швидкості руху об'єкта, то і частота змінення вихідної напруги U_H буде пропорційною до швидкості об'єкта. На практиці магнітне поле задається нерухомим магнітом, а його змінення – спеціальним екраном, що обертається, із прорізами.

При обертанні екрана 1 його сегменти 2 і прорізи 3 (рис. 2.22) по черзі проходять між магнітом 4 і датчиком Холла 5.

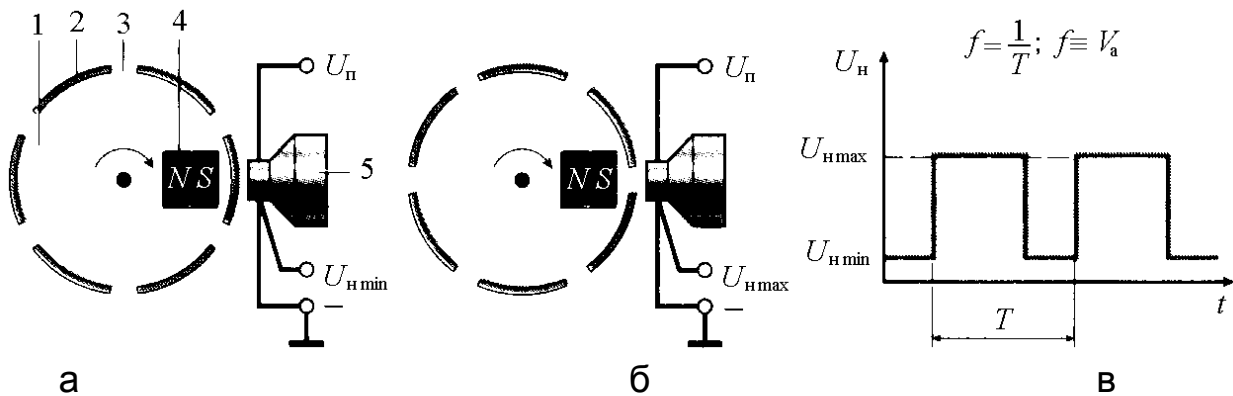


Рис. 2.22. Принцип роботи датчика швидкості

Коли між магнітом і датчиком Холла проходить сегмент екрана (рис. 2.22, а), магнітне поле перекривається. У цьому випадку на виході датчика значення напруги буде мінімальним $U_{H\min}$. При проходженні між магнітом і датчиком Холла прорізу екрана (рис. 2.22, б) на датчик надходить максимальний магнітний потік, і на виході датчика значення напруги стає максимальним $U_{H\max}$. Таким чином, при обертанні екрана зі швидкістю, пропорційною до швидкості руху об'єкта, на виході датчика швидкості виникають імпульси напруги U_H (рис. 2.22, в), частота надходження яких є пропорційною до швидкості переміщення об'єкта.

2.5. Датчики температури

Найпростішим і найпоширенішим способом визначення температури є вимірювання теплового розширення різних речовин [3, 7]. На цій властивості реалізовано усі рідинні скляні термометри.

Вимірювання температури завжди полягає в переданні невеликої порції теплової енергії від об'єкта до датчика, який перетворює цю енергію на електричний сигнал. Коли контактний детектор (зонд) поміщається всередину об'єкта або на нього, між об'єктом і зондом відбувається

передача тепла внаслідок теплопровідності. При цьому чутливий елемент, що входить до складу зонду, або розігрівається, або охолоджується. Те саме відбувається при переданні тепла з допомогою випромінювання: тепла енергія у вигляді випромінювання або поглинається датчиком, або виділяється ним залежно від температури об'єкта і типу оптичного зв'язку. Будь-який датчик, незалежно від його розмірів, збуджує зону вимірювання, що призводить до виникнення помилок при визначенні температури. Це стосується будь-яких способів детектування: радіаційних, конвективних і теплопровідних. Таким чином, розробник повинен завжди прагнути мінімізувати похибку вимірювання, застосовуючи відповідні конструкції датчиків і методи компенсації похибок.

Найбільш поширеними є *рівноважний* і *прогнозний* методи вимірювання температури [3]. Застосування першого методу вимірювання температури є доцільним тоді, коли між вимірюваною поверхнею і чутливим елементом, який розташовано в зонді, виникає тепла рівновага, тобто між датчиком і об'єктом вимірювання немає істотної різниці температур.

При застосуванні методу прогнозування під час проведення вимірювання тепла рівновага не виникає, а поточна температура обчислюється за швидкістю змінення температури датчика. З моменту розміщення чутливого елемента на об'єкті до виникнення теплової рівноваги між об'єктом і датчиком може пройти досить багато часу, особливо якщо контактні майданчики є сухими. Для контролю технологічних процесів широко застосовують такі типи датчиків температури: резистивні, термоелектричні, напівпровідникові, оптичні й п'єзоелектричні [3, 9, 13].

Спрощену принципову схему термоелектричного датчика температури зображено на рис. 2.23. В основу роботи такого датчика покладено властивість провідників і напівпровідників змінювати свій опір при змінненні температури.

Терморезистор R_T увімкнено в одне з плечей вимірювального мосту (мосту Уінстона). Таке підімкнення терморезистора забезпечує незалежність вихідних сигналів датчика від коливання напруги живлення.

Вихідний сигнал датчика знімається з діагоналі вимірювального мосту, який складається з резисторів R_1 , R_2 , R_3 і R_T , підсилюється і перетворюється на вихідну напругу U_d . Величина U_d залежить від значення опору резистора R_T . При зростанні температури навколишнього середовища опір R_T зменшується, що призводить до збільшення розбалансування мосту і збільшення вихідної напруги U_d .

Параметри реального датчика необхідно добрати таким чином, щоб значення напруги U_d лінійно змінювалося залежно від температури навколишнього середовища, причому величина U_d (у мілівольтах) чисельно дорівнювала (була пропорційною) значенню вимірюваної температури, вираженої, наприклад, у градусах Кельвіна.

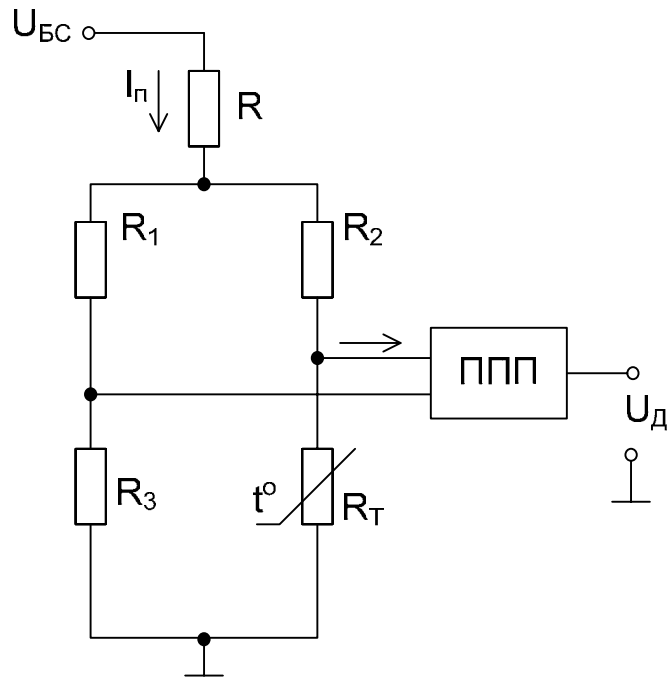


Рис. 2.23. Принципова схема терморезисторного датчика температури:
ППП – підсилювально-перетворювальний пристрій

На рис. 2.24 показано структури *контактного* й *безконтактного* датчиків температури.

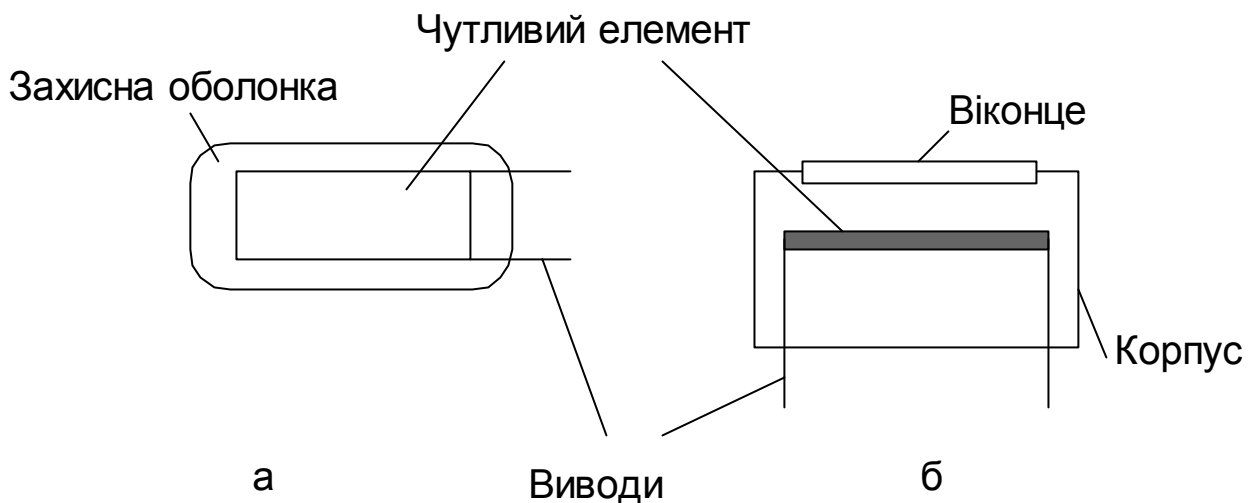


Рис. 2.24. Структури контактного (а) і безконтактного (б) датчиків температури

Датчик температури являє собою оптичний детектор теплового випромінювання [7]. До його складу входить чутливий елемент, що реагує на змінення власної температури. Основна відмінність контактних і безконтактних датчиків полягає в способі передання тепла від об'єкта до датчика: в контактних датчиках задіяно механізм теплопровідності через фізичний контакт, у безконтактних тепло передається промінням. Для збільшення швидкодії датчиків теплових випромінювань товщину чутливого елемента роблять мінімальною, тоді як для збільшення

чутливості збільшують площу його поверхні.

До складу безконтактного теплового датчика може входити оптичне віконце й вбудована інтерфейсна схема. Внутрішня частина корпусу датчика зазвичай заповнюється сухим повітрям або азотом.

Усі датчики температури поділяють на два класи: *абсолютні* й *відносні*. Абсолютні датчики вимірюють температуру відносно абсолютного нуля або будь-якої іншої точки на температурній шкалі, наприклад відносно $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($273,5\text{ K}$), $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ і т. ін. Прикладами абсолютних датчиків є термістори й резистивні детектори температури [7, 16]. Відносні датчики вимірюють різницю температур двох об'єктів.

Напівпровідникові датчики температури будуються на основі *p-n-переходу*. Характеристики напівпровідникового *p-n-переходу* в діодах і біполярних транзисторах сильно залежать від температури [7, 11]. Якщо прямо зміщений перехід з'єднати з генератором постійного струму (рис. 2.25), то вихідна напруга, яку знімають з нього, буде змінюватися прямо пропорційно до змінення його температури.

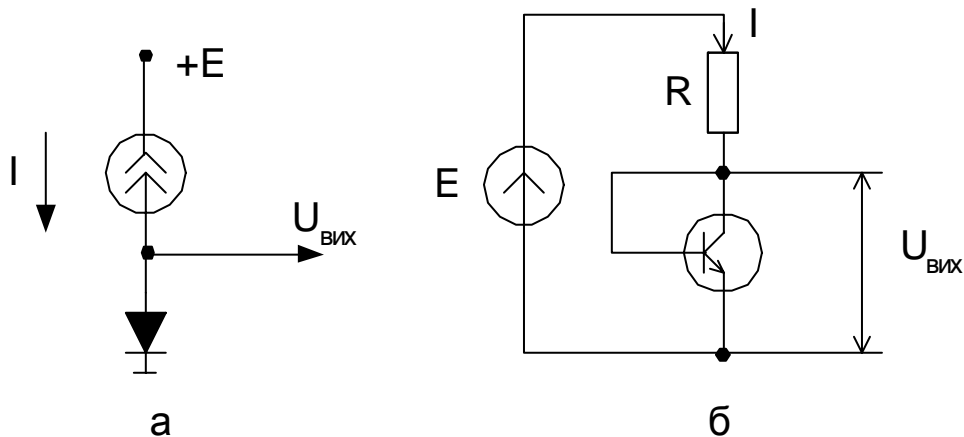


Рис. 2.25. Датчики температури на основі зміщеного *p-n-переходу*: а – діод; б – транзистор, увімкнений за схемою діода

Перевагою такого датчика є його лінійність. Це дає можливість проводити його калібрування тільки за двома точками для визначення нахилу прямої та її перетину з координатною віссю (нахил прямої характеризує чутливість детектора).

Принцип роботи *флуоресцентних датчиків* ґрунтується на властивості деяких фосфорних компонентів випромінювати світло у відповідь на збудження променями видимого діапазону спектра. Такі компоненти наносять на поверхню об'єкта, температуру якого необхідно виміряти. Цей об'єкт опромінюється ультрафіолетовими імпульсними променями. Післясвітіння, що виникло внаслідок цього опромінення, детектується й аналізується. На рис. 2.26, а показано спектральні характеристики збуджувального й флуоресцентного випромінювань. Форма імпульсу післясвітіння залежить від температури об'єкта. Час спаду імпульсу післясвітіння в широкому температурному діапазоні є параметром, що має

дуже високу відтворюваність [7]. Як чутливий матеріал у флуоресцентних датчиках застосовується, наприклад, фтормагнетит магнію, активований чотиривалентним марганцем.

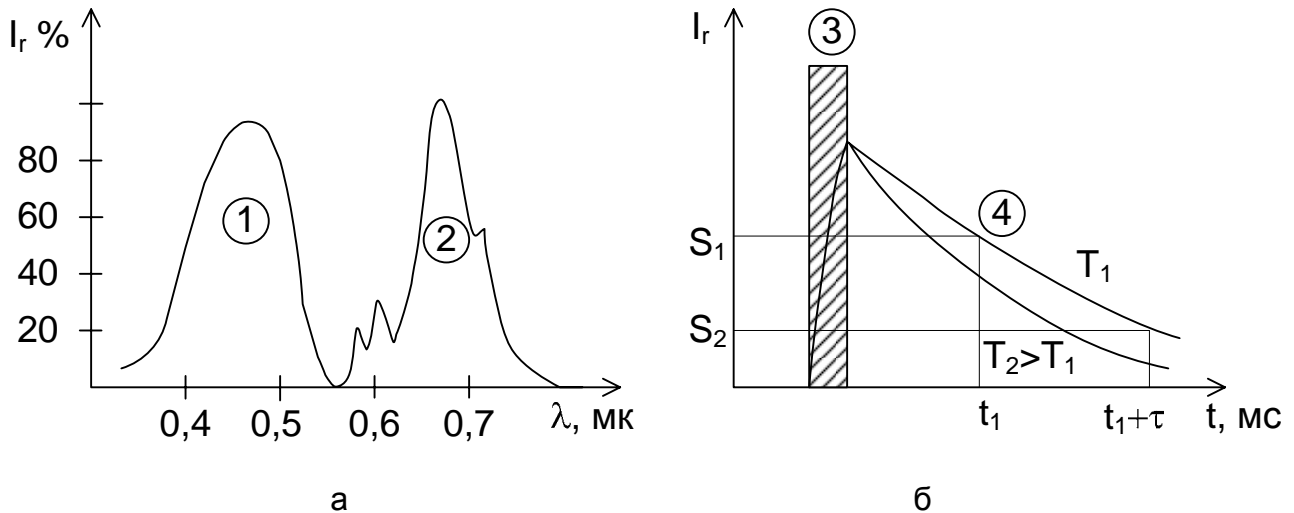


Рис. 2.26. Флуоресцентний метод вимірювання температури: а — спектральні характеристики збуджувального й флуоресцентного випромінювань; б — спад інтенсивності післясвітіння за експоненціальним законом для температур T_1 і T_2

Процес вимірювання температури полягає у визначенні швидкості послаблення флуоресцентного світіння (рис. 2.26, б). Це означає, що температуру визначають за постійною часу τ , величина якої в температурному діапазоні $-200...400$ °C зменшується в п'ять разів. Час вимірюють з допомогою електронної схеми, зазвичай з дуже високою точністю. Датчики флуоресцентного типу дають змогу вимірювати температуру з високою розрізнявальною здатністю і точністю ± 2 °C в широкому температурному діапазоні без калібрування.

Оскільки постійна часу не залежить від інтенсивності збуджувального випромінювання, можлива реалізація датчиків найрізноманітніших конструкцій. Наприклад, фосфорне покриття можна наносити безпосередньо на поверхню об'єкта, при цьому оптична система вимірює температуру безконтактним способом (рис. 2.27).

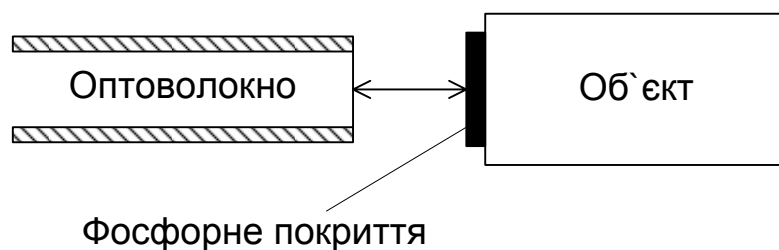


Рис. 2.27. Схема вимірювання температури з допомогою флуоресцентного покриття

Це дає можливість проводити безперервний моніторинг температури об'єкта без збудження зони вимірів. В іншій конструкції фосфор наноситься, наприклад, на кінець пружного зонда, здатного тісно контактувати з об'єктом.

2.6. Датчики сили, механічної напруги і дотику

Для визначення тиску необхідно виміряти силу. Уважається, що при роботі з твердими об'єктами вимірюється сила, а при роботі з рідинами й газами — тиск. Це означає, що силу визначають тоді, коли дію прикладено до конкретної точки, а тиск — коли силу розподілено на значній площі.

Датчики сили поділяють на кількісні і якісні [3].

Кількісні датчики вимірюють силу в електричних одиницях. Прикладами таких датчиків є динамометричні елементи й тензодатчики.

Якісні датчики — це порогові пристрої, функція яких полягає не в кількісному обчисленні значення сили, а в детектуванні перевищення заданого рівня прикладеної сили. Прикладом таких пристроїв є клавіатура комп'ютера, кожна клавіша якої замикає відповідний контакт тільки при натисненні на неї з певною силою.

У більшості датчиків сила прямо не перетворюється на електричний сигнал. Для цього зазвичай потрібно декілька проміжних етапів. Тому датчики сили є складеними. Наприклад, датчик сили часто є комбінацією перетворювача сила — переміщення і детектора положення (переміщення). Це може бути проста спіральна пружина, зменшення довжини x якої викликано силою стискання F , прикладеною пропорційно до коефіцієнта пружності:

$$X = kF. \quad (2.24)$$

У деяких датчиках положення й переміщення використовується принцип електромагнітної індукції. Індукційний перетворювач зазвичай складається з первинної і вторинної котушок індуктивності. На первинну котушку подається сигнал змінної опорної напруги $U_{вх}$. При цьому на вторинній котушці індукується сигнал змінної вихідної напруги $U_{вих}$. Значення амплітуди $U_{вих}$ залежить від величини потокозчеплення між двома котушками. Існує два способи змінення потокозчеплення: переміщення об'єкта, виготовленого з феромагнітного матеріалу, усередині магнітного контуру датчика та фізичне переміщення однієї котушки відносно іншої. При цьому змінюється значення магнітного опору між котушками, що змінює потокозчеплення.

За цим принципом реалізуються лінійно-регульовані диференціальні трансформатори (ЛРДТ) та індуктивні датчики наближення. Схему ЛРДТ (трансформатора з механічно керованим осердям) показано на рис. 2.28.

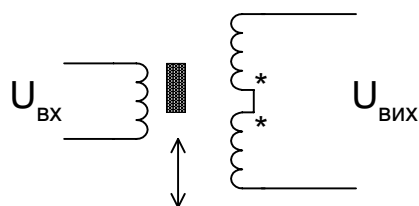


Рис. 2.28. Схема лінійно-регульованого диференційного трансформатора

На первинну обмотку ЛРДТ подається синусоїдальна напруга постійної амплітуди. На вторинних обмотках індукується змінна напруга. У циліндричний отвір між котушками вставляють осердя з феромагнітного матеріалу. Дві вторинні обмотки вмикають зустрічно. Коли осердя знаходиться всередині трансформатора, вихідні сигнали вторинних котушок взаємно компенсують один одного. Переміщення осердя убік від центрального положення призводить до змінення магнітних потоків у вторинних обмотках. Унаслідок розбалансу виникає вихідна напруга. Величина поточкозчеплення визначається осьовим положенням осердя. У лінійній робочій області в стаціонарному режимі амплітуда індукованого сигналу $U_{вих}$ є пропорційною до зміщення осердя. Тому вихідна напруга може бути мірою переміщення осердя відносно котушок індуктивності. Вихідний сигнал ЛРДТ відображає не лише величину переміщення, але і його напрям, який визначається фазовим кутом між опорною і вихідною напругами.

На рис. 2.29, а показано схему датчика сили, який складається з пружини й детектора переміщень, реалізованого на основі ЛРДТ, а на рис. 2.29, б — датчика сили на основі перетворювача тиску. У лінійному діапазоні змінення довжини пружини значення напруги на виході ЛРДТ є пропорційним до прикладеної сили.

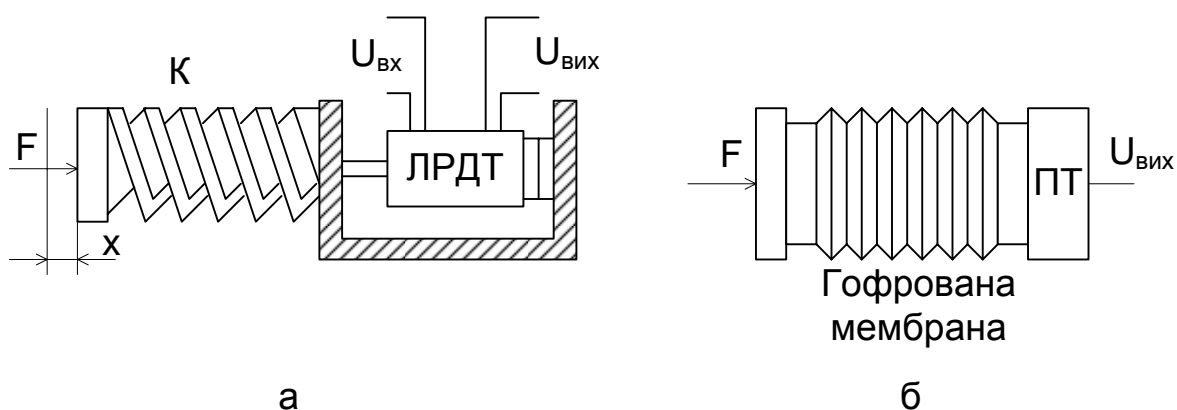


Рис. 2.29. Датчики сили: з навантажуваною пружиною (а); на основі перетворювача тиску (б)

Тензодатчик – це гнучкий резистивний чутливий елемент, опір якого є пропорційним до прикладеної механічної напруги (величини деформації). Усі тензодатчики побудовано на основі п'єзорезистивного ефекту. Для

значень їхніх опорів R має місце таке співвідношення [3]:

$$\frac{dR}{R} = S_e, \quad (2.25)$$

де S_e – коефіцієнт тензочутливості матеріалу;
 e – величина деформації.

Для більшості матеріалів $S_e = 2$ (для платини $S_e = 6$). При невеликих змінах (до 2 %, що має місце для більшості практичних випадків) опору металевого дроту правильним є таке співвідношення:

$$R = R_0(1 + x), \quad (2.26)$$

де R_0 – опір тензодатчика в ненавантаженому стані; $x = S_e e$.

Для напівпровідникових матеріалів величина тензочутливості залежить від концентрації домішок. Величина опору тензорезистора зменшується при стисканні й збільшується при розтягуванні. Дротяний тензодатчик є резистором, наклеєним на гнучку підкладку (рис. 2.30), яка прикріплюється на об'єкт, де вимірюється сила або напруга.

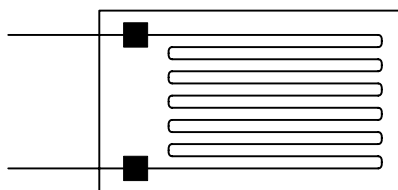


Рис. 2.30. Тензодатчик на гнучкій підкладці

Під час випробовувань має забезпечуватися надійний механічний зв'язок між об'єктом і тензочутливим елементом, тоді як дріт резистора має бути електрично ізольованим від об'єкта. Для отримання хорошої чутливості датчик повинен мати довгі подовжні й короткі поперечні ділянки.

Тактильні датчики – це спеціальний клас перетворювачів сили або тиску, які характеризуються невеликою товщиною. Ці датчики є корисними у випадках, коли сила або тиск вимірюються між двома поверхнями, розташованими близько одна до одної. Датчики використовуються в сенсорних дисплеях, клавіатурах та інших пристроях, де реагування є фізичним (на дотик). Для виготовлення тактильних чутливих елементів на поверхні об'єкта формується спеціальний тонкий шар з матеріалу, чутливого до механічної напруги. На рис. 2.31 зображено простий тактильний датчик, який реалізує функцію ввімкнення-вимкнення.

Датчик складається з листів фольги й прокладки. У середині прокладки зроблено отвори. Один із листів фольги заземлено, а другий приєднано до резистора навантаження. Коли до верхнього листа прикладається зовнішня сила над отвором в прокладці, він прогинається і

стикається з нижнім листом фольги, тим самим установлюючи з ним електричний контакт, що заземлює резистор навантаження. При цьому вихідний сигнал стає тотожним нулю, що свідчить про прикладену силу.

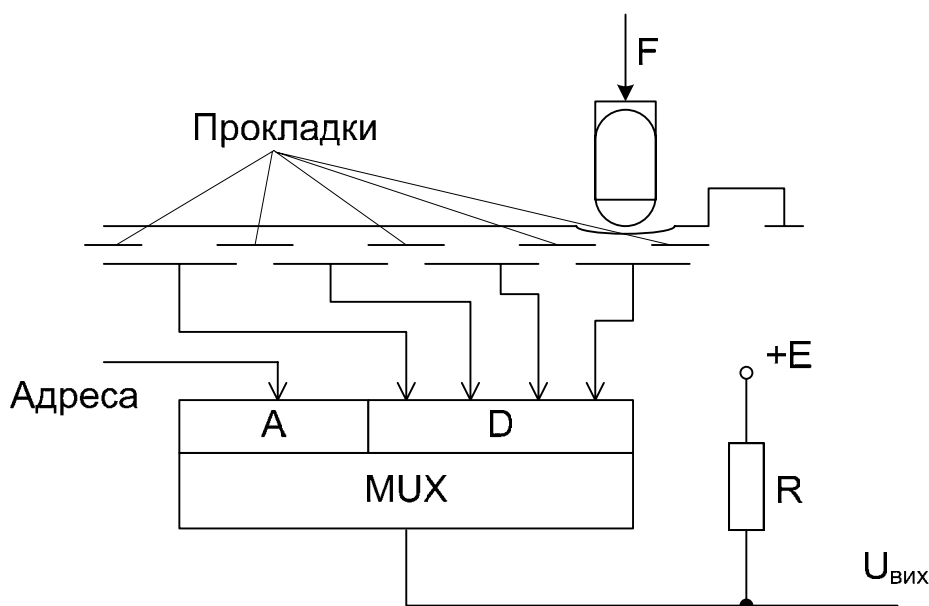


Рис. 2.31. Тактильний датчик мембранного типу

На основі п'єзоелектричного ефекту створюють як активні, так і пасивні прецизійні датчики сили. П'єзоелектричні пристрої не можуть вимірювати стаціонарні процеси. Це означає, що п'єзоелектричні датчики сили перетворюють змінення сили на змінний електричний сигнал, але при цьому ніяк не реагують на постійну зовнішню силу. Принцип дії таких датчиків базується на тому, що при механічному навантаженні кварцевих кристалів певних зрізів, які використовуються як резонатори в генераторах електричних коливань, зсувається їхня резонансна частота. Вираз для спектра власних механічних частот п'єзоелектричного генератора має вигляд [3]

$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{c}{\rho}}, \quad (2.27)$$

де n – номер гармоніки;

l – геометричний параметр, що визначає резонансну частоту;

c – коефіцієнт пружної деформації;

ρ – щільність кристала.

Частотний зсув виникає через нелінійність залежностей деяких параметрів кристала від величини зовнішніх сил.

2.7. Датчики тиску

Датчики тиску дають змогу вимірювати *абсолютний, диференціальний і манометричний тиски*. *Абсолютний тиск*, наприклад барометричний, зіставляється з тиском в еталонній вакуумній камері, яка може бути як вбудованою так і зовнішньою. *Диференціальний тиск*, наприклад перепад тиску в диференціальних витратомірах, вимірюється при одночасному поданні тиску з двох сторін діафрагми. *Манометричний тиск* визначається відносно деякого еталонного значення. Прикладом може бути вимірювання кров'яного тиску. Таке вимірювання проводиться відносно атмосферного тиску. Манометричний тиск за своєю суттю є різновидом диференціального тиску.

Тиск має механічну природу, і тому для його опису можна використовувати основні фізичні величини: масу, довжину і час. Усі матеріали можна умовно поділити на тверді тіла й рідкі середовища [1,3,7]. Найчастіше такі датчики застосовують для вимірювання тиску газів. Під рідким середовищем тут розуміється все, що має здатність текти. Це можуть бути як рідини, так і гази, оскільки між ними не існує істотних відмінностей. До рідких середовищ неможливо прикласти тиск ні в якому напрямі, окрім перпендикулярного до поверхні. У стаціонарних умовах тиск рідкого середовища можна виразити через відношення сили F (що є перпендикулярною до поверхні) до площі A цієї поверхні:

$$p = \frac{dF}{dA}. \quad (2.28)$$

При збільшенні висоти тиск зменшується, що можна виразити таким співвідношенням:

$$dp = -wdh, \quad (2.29)$$

де w — питома вага середовища; dh — змінення висоти; dp — змінення тиску.

Тиск рідкого середовища в замкнутій системі не залежить від форми посудини, тому при розробленні датчиків тиску такі параметри, як форма і розміри, часто не є дуже істотними. Якщо на одну із сторін посудини з рідиною або газом діє зовнішній тиск, то цей тиск передається по всьому об'єму без зменшення його значення.

Надмірний тиск — це тиск газу, що перевищує тиск довкілля. Тиск називають *відносним*, коли його вимірюють відносно тиску довкілля, і *абсолютним* — коли вимірюють відносно нульового тиску. Тиск середовища може бути стаціонарним, коли рідке середовище перебуває у

спокої, або динамічним, коли рухається. Чутливі елементи, які входять до складу датчиків тиску, є механічними пристроями, що деформуються під дією зовнішньої напруги. Такими пристроями є гофровані й підвісні діафрагми, мембрани, сильфони та інші елементи, форма яких змінюється під дією тиску.

Принцип дії будь-якого датчика тиску полягає в перетворенні тиску, що діє на чутливий елемент, на електричний сигнал. Конструкція майже усіх перетворювачів тиску має сенсори з певним значенням площі поверхні. Під дією тиску виникає деформація або переміщення цієї поверхні. Ступінь деформації визначається під час вимірювань. Таким чином, датчики тиску реалізуються зазвичай на основі детекторів переміщення або сили, причиною виникнення якої є теж переміщення.

Існує велика кількість датчиків тиску (ртутні, сильфонні, мембранні, п'єзоелектричні, ємнісні, змінного магнітного опору, оптоелектронні, вакуумні тощо) [3, 7]. Розглянемо структуру й принцип дії деяких з них. На рис. 2.32 наведено схему простого ртутного датчика тиску, побудованого за принципом сполучених посудин.

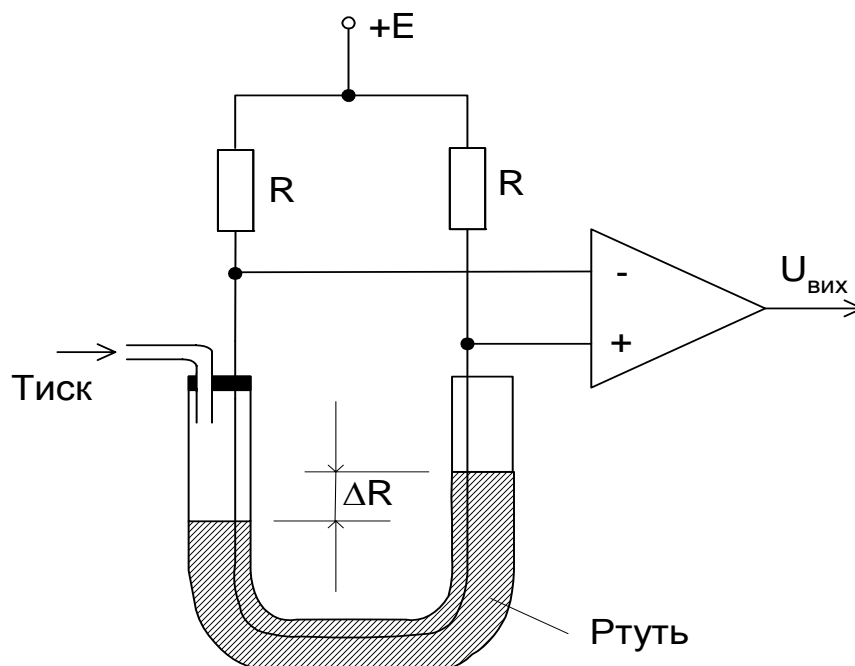


Рис. 2.32. U-подібний ртутний датчик тиску

U-подібний дріт з точкою заземлення в центрі поміщається в U-подібну трубку зі ртуттю. Частина цього дроту занурено у ртуть. Унаслідок цього опір в обох гілках дроту завжди буде пропорційним до висоти стовпчиків ртуті. Опори дротів увімкнено в схему моста, який перебуває в урівноваженому стані, доки дорівнює нулю диференційний тиск у трубці.

Тиск, прикладений до одного з кінців трубки, призводить до

розбалансування мостової схеми й появи на її виході ненульового сигналу. Вихідна напруга датчика є пропорційною до різниці опору дротів у двох плечах моста (у незамкнених ртуттю ділянках дроту) [7]:

$$U_{вих} = V \frac{\Delta R}{R} = V \beta \Delta p. \quad (2.30)$$

Діафрагма перетворює тиск на лінійне переміщення (рис. 2.33), яке можна виміряти з допомогою відповідного датчика. Таким чином, діафрагма виконує перший етап перетворення тиску на електричний сигнал. Відносно велика площа її поверхні дає можливість отримувати досить істотні переміщення при невеликих тисках.

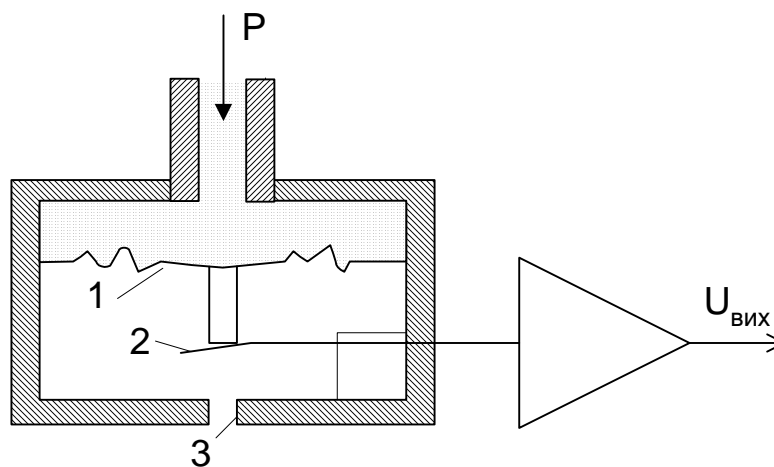


Рис. 2.33. Датчик тиску: 1 – діафрагма; 2 – тензодатчик; 3 – вентиляційний отвір

Вакуумні датчики тиску. При здійсненні багатьох технологічних процесів необхідно вимірювати дуже низькі тиски. Звичайні датчики тиску не можуть визначати дуже низькі концентрації газів через низьке відношення сигнал/завада. На відміну від традиційних датчиків тиску вимірювачі вакууму працюють на інших принципах, які ґрунтуються на фізичних властивостях молекул газів і полягають у визначенні кількості молекул у заданому об'ємі. До таких фізичних властивостей належать, наприклад, теплопровідність, в'язкість, іонізація. Для вимірювання низьких тисків частіше застосовуються вакуумметри Пірані, іонізаційні датчики й датчики газового опору [3, 6, 7]. В іонізаційному датчику значення струму іонів між пластиною й ниткою розжарення вакуумної лампи майже лінійно залежить від концентрації молекул газу (рис. 2.34) [7, 8].

Лампи вакуумних датчиків мають зворотне ввімкнення: на сітку подається висока позитивна напруга, а на пластину (анод) – низька негативна. Вихідним сигналом іонізаційного датчика є струм іонів I_n , який знімається з пластини. Його значення є пропорційним тиску й струму електронів I_c на сітці.

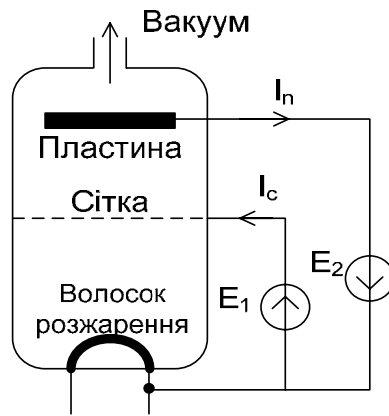


Рис. 2.34. Іонізаційний вакуумний датчик тиску

2.8. Датчики вологості і вмісту води

Комфортність навколишніх умов для підсистем КІВ визначається в основному двома чинниками: відносною вологістю і значенням температури. Імовірність безвідмовної роботи багатьох пристроїв (електронних схем, електростатичних чутливих елементів, високовольтних приладів і т. ін.) суттєво залежить від значень температури й рівня відносної вологості. Зазвичай усі характеристики пристроїв визначаються при відносній вологості 50 % і температурі 20–25 °С.

Для вимірювання вологості використовуються датчики, що мають назву *гігрометрів*. Чутливий елемент гігрометра вибірково реагує на змінення концентрації води. Його реакцією є змінення внутрішніх властивостей. Широко застосовуються ємнісні, електропровідні, вібраційні й оптичні датчики для вимірювання вологості [7].

Діелектрична проникність вологого повітря є пропорційною до значення відносної вологості. Тому в ємнісному датчику вологості простір між пластинами конденсатора може бути заповнений не повітрям, а відповідним матеріалом, діелектрична проникність якого значно залежить від вологості довкілля. Наприклад, ємність датчика, сформованого на основі гігроскопічної полімерної плівки з нанесеними з двох сторін металевими електродами, є майже пропорційною до значення відносної вологості H [7]:

$$C_h \approx C_0(1 + \alpha_h H), \quad (2.31)$$

де C_0 – ємність конденсатора при $H = 0$.

На рис. 2.35 показано схему ємнісного датчика вологості, де змінення діелектричної проникності досліджуваного середовища приводить до змінення частоти генератора імпульсів.

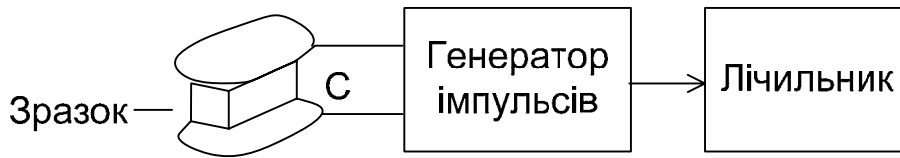


Рис. 2.35. Ємнісний датчик вологості

Зразок досліджуваного матеріалу поміщається між двома пластинами, що формують конденсатор, приєднаний до LC-коливального контуру. Лічильник вимірює значення частоти проходження імпульсів. Значення частоти визначається значенням відносної вологості досліджуваного середовища. Датчики на основі термісторів вимірюють вологість з урахуванням змінення теплопровідності газів (рис. 2.36).

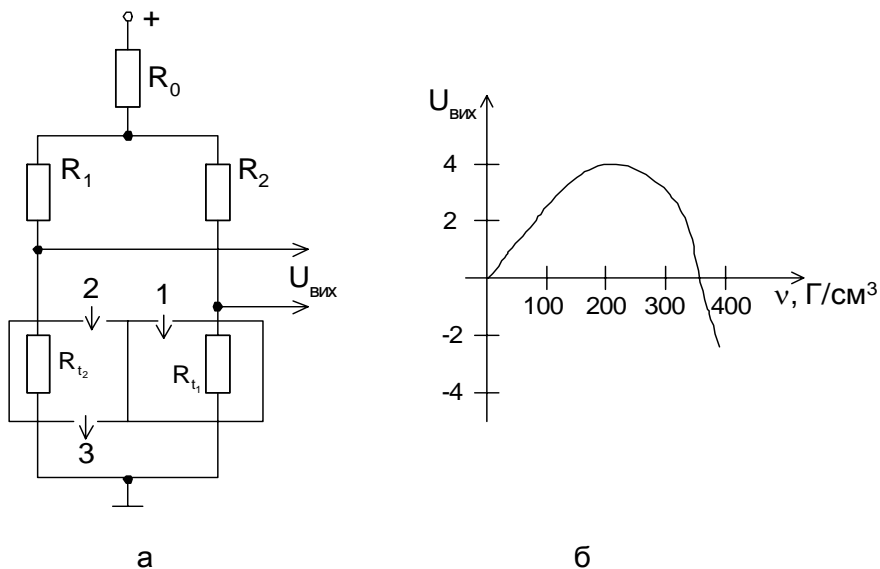


Рис. 2.36. Датчик абсолютної вологості з саморозігрівом термістора: а — схема й електричні з'єднання; б — залежність вихідної напруги від вологості

Такі датчики складаються з двох термісторів R_{t_1} і R_{t_2} , закріплених з допомогою дуже тонких дротів для зменшення теплових втрат через корпус. Додіжуваний газ, що надходить через невеликі вентиляційні отвори, впливає на значення опору лівого термістора R_{t_1} , причому правий термістор R_{t_2} знаходиться в герметичній камері із сухим повітрям. Обидва термістори ввімкнено в мостову схему, на яку подається напруга +Е. При проходженні через термістори струму їхня температура підвищується відносно температури зовнішнього середовища.

Балансування моста має проводитися в умовах сухого повітря. Коли міст набуде зрівноваженого стану, вихідна напруга дорівнюватиме нулю.

При відхиленні абсолютної вологості повітря від нульового значення поступово підвищується вихідна напруга.

Резистивні датчики вологості. Опір багатьох неметалічних провідників в основному залежить від наявності в них води. На цьому принципі реалізуються резистивні датчики вологості або гігристи. На рис. 2.37 показано схему гігриста.

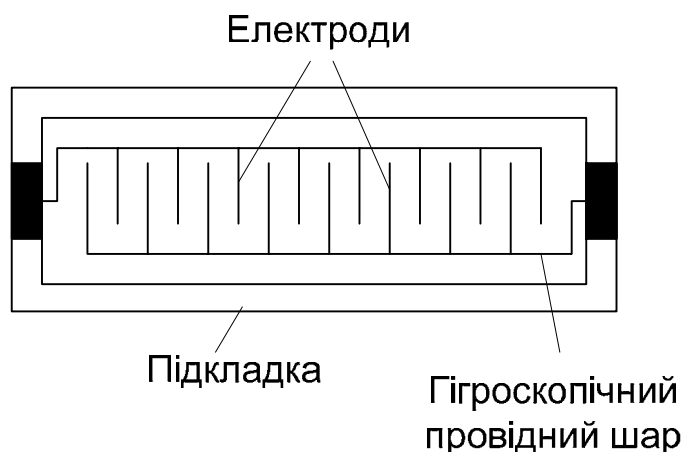


Рис. 2.37. Схема гігриста

У гігристи використується матеріал, що має порівняно низький питомий опір, який дуже залежить від вологості навколишнього середовища. Шар такого матеріалу досить великої площі наноситься поверх гребінчастих електродів.

Коли молекули води ним поглинаються, опір між електродами змінюється, що реєструється з допомогою електронної схеми. Як плівку для гігристорів використовують, наприклад, полістирол, оброблений сірчаною кислотою [7].

2.9. Хімічні датчики

Хімічні датчики реагують або на певні хімічні речовини, або на хімічні реакції. Їхнє призначення — ідентифікація й кількісне визначення хімічних реагентів у газовій і рідкій фазах речовин [3, 7]. Усі хімічні датчики поділяють на дві великі групи: прямої і непрямой дії.

Датчики прямої дії (прості) базуються на властивостях деяких хімічних реакцій змінювати параметри електричного ланцюга (опір, напругу, струм або ємність) (рис. 2.38). Такі датчики використовують як додаткові схеми для узгодження вихідних електричних сигналів з інтерфейсними схемами, але в них немає перетворювачів, що конвертують одну форму енергії на іншу.



Рис. 2.38. Датчик прямої дії

Датчики непрямої дії (складені) (рис. 2.39) базуються на хімічних реакціях, що не викликають безпосереднього змінення електричних параметрів. Тому до їх складу завжди входять додаткові перетворювачі, що перетворюють побічні явища реакцій на електричні сигнали. Розглянемо приклади деяких хімічних датчиків.

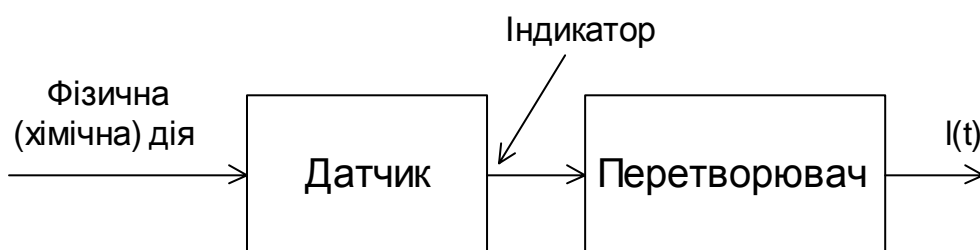


Рис. 2.39. Датчик непрямої дії

Метал-оксидні хімічні датчики побудовані на основі діоксиду олова (SnO_2), є простими пристроями, досить легко узгоджуються з електричними схемами. Дія датчиків ґрунтується на властивості деяких оксидів металів за наявності певних газів (таких, як CH_3SH і $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) змінювати свої електричні характеристики. При нагріванні в повітрі кристалів оксиду металу (наприклад, SnO_2) до високої температури поверхня кристалу починає адсорбувати атоми кисню. Унаслідок цього вона стає зарядженою, що зменшує значення струму, який проходить через датчик.

При впливі на поверхню детектора певних газів відбувається зменшення її потенціалу, що значно збільшує провідність кристала. Для знаходження співвідношення між електричним опором плівки й вимірюваної концентрацією газів можна скористатися виразом [7]

$$R_s = AC^{-\alpha},$$

де R_s — електричний опір детектора;

A — константа, яку визначено для хімічного складу речовини;

C — концентрація досліджуваних газів;

α — нахил характеристичної кривої опору, яку побудовано для певних оксиду металу і типу газу.

Оскільки в таких датчиках змінюється питомий опір кристала, вони не можуть працювати самостійно, а їх необхідно включити до складу додаткової електронної схеми. Такою схемою зазвичай є міст Уїнстона, в одне з плечей якого вбудовано датчик. Змінення опору датчика призводить до розбалансування моста (рис. 2.40).

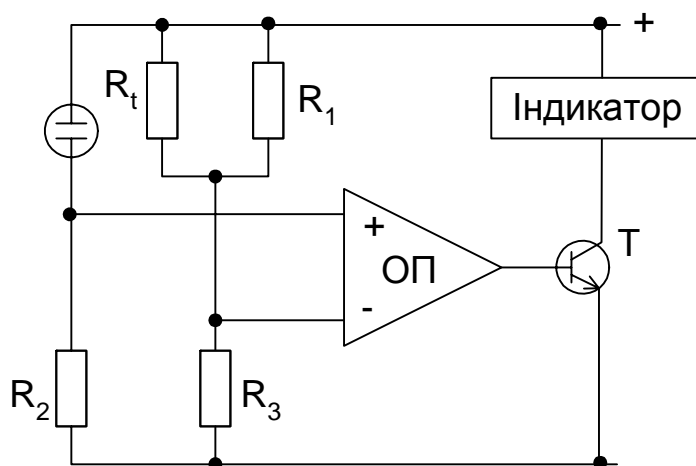


Рис. 2.40. Метал-оксидний хімічний детектор

Для температурного балансування мостової схеми застосовується термістор R_t з негативним температурним коефіцієнтом опору. Резистор R_1 застосовується з метою лінеаризації характеристики датчика.

Оскільки датчик діє як резистор, величина опору якого змінюється залежно від типу газу та його концентрації, падіння напруги на ньому буде пропорційним до значення опору. За швидкістю змінення провідності датчика можна ідентифікувати тип газу й визначити його концентрацію [7].

Робота *оптичних хімічних датчиків* ґрунтується на взаємодії електромагнітних хвиль з досліджуваним зразком, унаслідок якої змінюються деякі властивості випромінювання (інтенсивність, поляризація, швидкість світла в середовищі). Модуляція довжини хвилі проміння відбувається через наявність у зразку певних хімічних речовин.

Оптичні модуляції сигналів досліджуються методами спектроскопії, що дають змогу отримувати різноманітну інформацію щодо мікроскопічної структури досліджуваної речовини.

Принцип функціонування оптичних хімічних датчиків полягає в дії на зразок (який може бути твердим, рідким або газоподібним) монохроматичного випромінювання. Електромагнітні хвилі, проходячи через дослідний зразок, змінюють його властивості, що приводить до модуляції

вихідного сигналу. Дуже часто зовнішнє випромінювання приводить до виникнення вторинного випромінювання (індукованої люмінесценції), інтенсивність якого є пропорційною до концентрації речовини, що аналізується у складі зразка.

Хемілюмінесцентні датчики при дії на них випромінюванням за наявності певних хімічних речовин починають випромінювати світло. Недисперсне поглинання інфрачервоного проміння можна використати для детектування таких газів, як CO_2 .

Які б методи виміру не використовувалися, для них є загальне правило, що для отримання максимально можливого електричного вихідного сигналу довжина хвилі джерела випромінювання має відповідати потужності вибраного оптичного детектора. Детектування падаючого й відбитого променей проводиться з допомогою фотодетекторів або фотоперемножувачів.

На рис. 2.41 показано оптоволоконний хімічний датчик, принцип дії якого базується на зміні або інтенсивності випромінювання, пройденого через хвилевід до приймального фотодетектора, або довжини хвилі проміння.

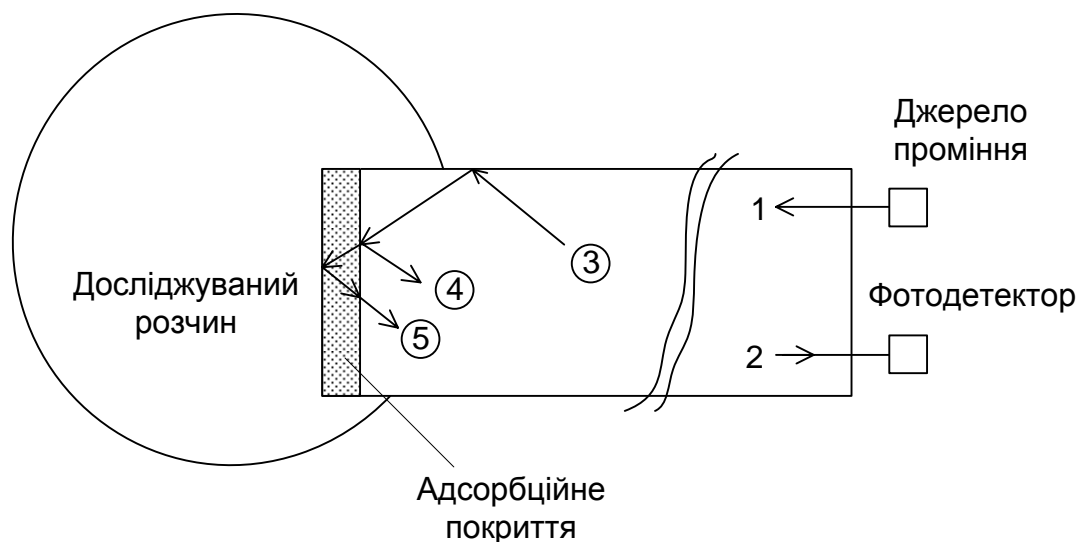


Рис. 2.41. Оптоволоконний хімічний датчик

Датчик зазвичай складається з трьох частин: джерела випромінювання, хвилеводу зі спеціальним адсорбційним покриттям на кінці й фотодетектора, який перетворює змінний світловий сигнал на електричний.

Покриття, нанесене на кінець оптоволоконна, виконує функцію або хімічно селективної мембрани, або індикатора, оптичні властивості якого залежать від складу зразка, що аналізується [7]. Розташування реагенту і його характеристики, що впливають на оптичні властивості детектора, залежать від типу датчика.

2.10. Датчики аварійних режимів

Датчики аварійних режимів сигналізують про вихід параметрів об'єкта (технологічного процесу) за допустимі межі (датчики перегріву охолоджувальної рідини, аварійного тиску мастила, аварійного падіння рівня гальмівної рідини, зношення гальмових колодок тощо) або увімкнення виконавчих пристроїв, що усувають аварійний режим (наприклад, датчик увімкнення електровентиллятора системи охолодження об'єкта). На відміну від інформаційних датчиків (положення, розміру, тиску, швидкості тощо), вихідні сигнали яких є пропорційними до змінення вимірюваних параметрів фізичних величин, датчики аварійних режимів реагують лише на порогові (максимально й мінімально допустимі) значення фізичної величини. У таких випадках замикаються контакти датчика і вмикається сигналізація або виконавчий пристрій, що ліквідує аварійний режим (рис. 2.42).

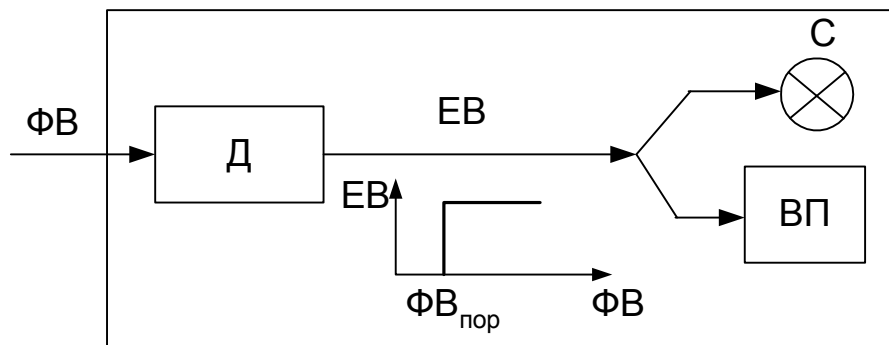


Рис. 2.42. Схема функціонування датчика аварійного режиму: ΦB – фізична величина; $E B$ – електрична величина; $\Phi B_{пор}$ – порогове значення фізичної величини; D – датчик; C – сигналізатор; $B П$ – виконавчий пристрій

Контрольні запитання

1. Дайте означення потенціометричного вимірювального перетворювача.
2. Накресліть схеми одно- й двотактного вимірювальних перетворювачів, наведіть їхні статичні характеристики.
3. Обґрунтуйте призначення функціональних перетворювачів.
4. Які чинники впливають на підвищення лінійності статичної характеристики потенціометричних вимірювальних перетворювачів?
5. Назвіть області застосування потенційних вимірювальних перетворювачів у мехатронних засобах.
6. Обґрунтуйте напрямки вдосконалення потенційних вимірювальних перетворювачів.
7. Дайте означення індуктивного вимірювального перетворювача.
8. Дайте означення трансформаторного вимірювального перетворювача.
9. Дайте означення ємнісного вимірювального перетворювача.

3. ЗАСОБИ І МЕТОДИ ЗБОРУ ПЕРВИННОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Джерелами первинної інформації СКК КІВ є технологічні й виробничі процеси, які сприймаються системою контролю й керування як випадкові, що характеризують стан і рух виробництва. Випадковий характер стану процесів обумовлений дією кількох зовнішніх і внутрішніх чинників (збурень), значною мірою неконтрольованих і некерованих. Збір первинної інформації призначено для перетворення значень параметрів технологічного процесу на цифрові повідомлення, передання й уведення їх у засоби оброблення й зберігання інформації.

Метою функціонування системи збору первинної інформації зазвичай є формування організованих масивів інформації, підготовлених для використання під час вирішення поточних і перспективних завдань контролю й керування. Система збору первинної інформації у загальному випадку має містити такі засоби [11, 16, 33, 34]:

- формування первинної інформації;
- перетворення первинної інформації;
- передання первинної інформації;
- накопичення первинної інформації;
- уведення первинної інформації з проміжних носіїв.

У процесі функціонування системи збору інформації СКК КІВ також беруть участь й інші пристрої, особливо комп'ютери, які зазвичай здійснюють керування збором інформації, виконують операції з її первинного оброблення, сортування й формування масивів даних [9, 34]. Розглянемо ці засоби більш детально.

3.1. Перетворювачі кодів

Перетворювачами кодів називають дискретні пристрої, які здійснюють перетворення слів вхідного алфавіту $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ на слова вихідного алфавіту $\{y_1, y_2, \dots, y_m\}$. У загальному випадку перетворювачі кодів мають n входів і m виходів. Обмеження на співвідношення величин n і m не накладаються. Відповідно до наведеного визначення до перетворювачів кодів можна віднести багато дискретних пристроїв, які перетворюють одні прості коди на інші, прості коди — на коригувальні й навпаки.

Однак на практиці під перетворювачами кодів розуміють більш вузький клас пристроїв комбінаційного типу, до яких належать пристрої, що перетворюють один конкретний код на інший (наприклад, двійково-десятковий код на циклічний тощо). До таких перетворювачів кодів належать дешифратори й шифратори. Перетворювачі кодів застосовують в системах контролю й керування, системах зв'язку й комп'ютерних засобах [5].

Перетворювачі кодів класифікують за призначенням, принципом дії і принципом будовання. За призначенням розрізняють перетворювачі прямого коду на зворотний, двійкового коду на двійково-десятковий, двійкового коду на код семисегментного індикатора й багато інших. За принципом дії можна вирізнити дві групи перетворювачів кодів: керовані (синхронні) і некеровані (асинхронні).

Важливою ознакою класифікації є принцип будовання перетворювачів кодів, відповідно до якого їх можна поділити на чотири групи. До першої групи належать перетворювачі кодів, які синтезуються як комбінаційні схеми на логічних елементах І, АБО, І-НЕ, АБО-НЕ та ін. До другої і третьої груп належать перетворювачі кодів, побудовані за блоковими схемами: дешифратор — шифратор, дешифратор — матриця запам'ятовувального пристрою; четверту групу утворюють перетворювачі кодів, які реалізуються на основі програмувальних логічних матриць.

На рис. 3.1 зображено умовні графічні позначення перетворювачів кодів. У загальному вигляді в основному полі прямокутника міститься позначення *X/Y* (рис. 3.1, а). Букви *X*, *Y* можна замінити позначенням на входах і виходах інформації, яка подається.

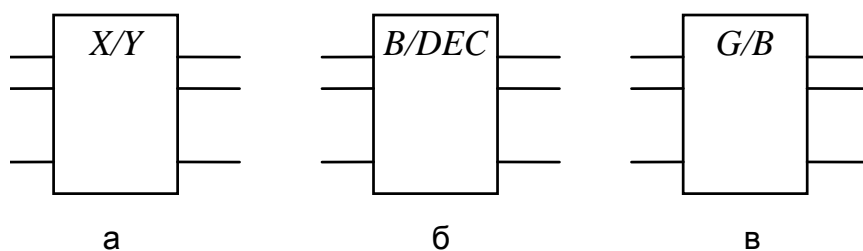


Рис. 3.1. Умовні графічні позначення перетворювачів кодів

Наприклад, на рис. 3.1, б зображено схему перетворювача двійкового коду на десятковий (*B* — від англ. *Binary* — двійковий, *DEC* — від англ. *Decimal* — десятковий), а на рис. 3.1, в — перетворювача коду Грея на двійковий код.

Будування перетворювачів кодів здійснюється відповідно до загальної методики синтезу комбінаційних дискретних пристроїв, яка містить три основні етапи:

- отримання таблиці відповідності, яка реалізується перетворювачем кодів;
- отримання й перетворення (мінімізація) логічних функцій, що описують синтезований перетворювач кодів;
- синтез функціональної і принципової електричних схем.

Реалізація другого й третього етапів синтезу перетворювачів кодів суттєво залежить від вибраного принципу будовання й заданої елементної бази. Розглянемо декілька прикладів будовання перетворювачів кодів.

Приклад 1. Побудуємо схему асинхронного перетворювача двійкового

коду 8421 на код 2421 на інтегральних логічних елементах 155ЛРЗ, 155ЛН1.

Код 2421 використовується для будування обчислювальних пристроїв, які обробляють інформацію у двійково-десятковій системі числення. Кожні чотири розряди цього коду призначено для відображення одного десяткового розряду відповідно до табл. 3.1, де X_4, X_3, X_2, X_1 — розряди десяткового коду з вагами 8421, а Y_4, Y_3, Y_2, Y_1 — розряди двійкового коду з вагами 2421 (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Десяткове число	Код 8421				Код 2421			
	X_4	X_3	X_2	X_1	Y_4	Y_3	Y_2	Y_1
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	0	1
2	0	0	1	0	0	0	1	0
3	0	0	1	1	0	0	1	1
4	0	1	0	0	0	1	0	0
5	0	1	0	1	1	0	1	1
6	0	1	1	0	1	1	0	0
7	0	1	1	1	1	1	0	0
8	1	0	0	0	1	1	1	0
9	1	0	0	1	1	1	1	1

Синтезована схема перетворювача — дискретний пристрій з чотирма входами і виходами. Значення виходів пристрою визначено тільки на 10 вхідних наборах із 16, інші шість наборів можна віднести до умовних, тому що вони не трапляються під час роботи пристрою. Схему перетворювача доцільно описати системою логічних функцій.

Після розв'язання задачі мінімізації отримаємо такі тупикові диз'юнктивні нормальні форми функцій (ДНФ), які розглядаються:

$$\begin{cases} y_1 = x_1; \\ y_2 = x_4 \vee x_2 \overline{x_3} \vee x_1 \overline{x_2} \overline{x_3}; \\ y_3 = x_4 \vee x_2 \overline{x_3} \vee \overline{x_1} x_3; \\ y_4 = x_4 \vee x_2 x_3 \vee x_1 x_3. \end{cases}$$

На рис. 3.2 показано функціональну схему синтезованого перетворювача, який містить три елементи (три корпуси) 155ЛРЗ і шість елементів (один корпус) 155ЛН1.

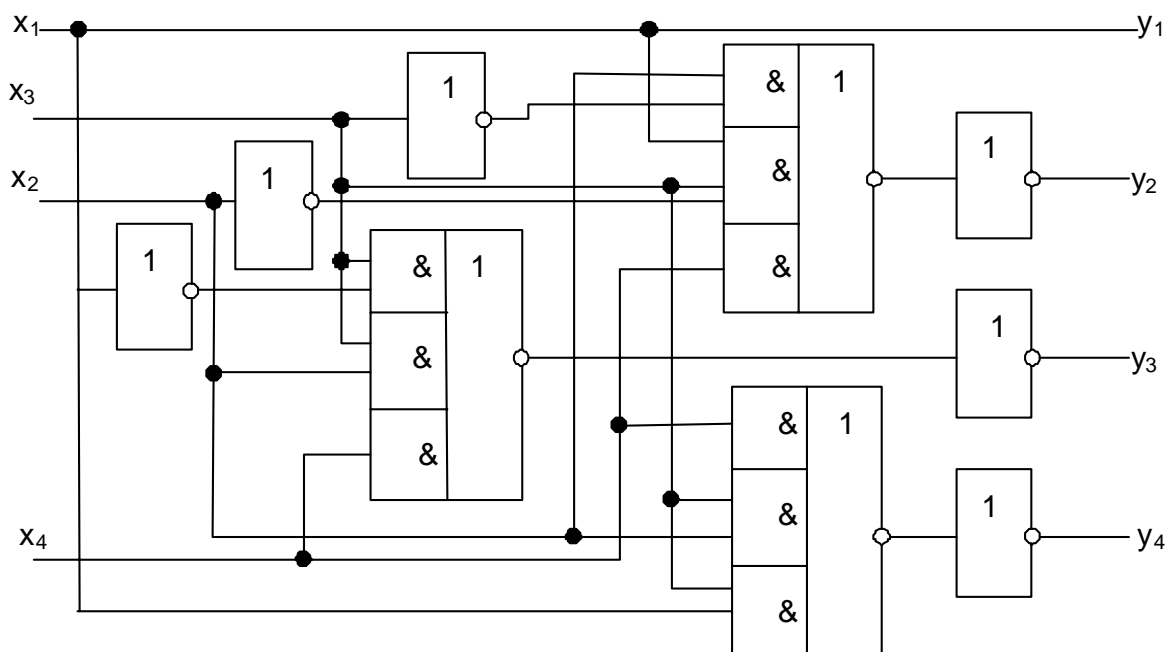


Рис. 3.2. Функціональна схема перетворювача кодів

3.2. Мультиплексори

Мультиплексором називають типовий функціональний пристрій з n інформаційними входами, m адресними входами та одним інформаційним виходом, який виконує функцію приймання інформації по одному з n входів, номер якого задається кодом, що надходить на групу адресних входів, і передання її на вихід (рис. 3.3).

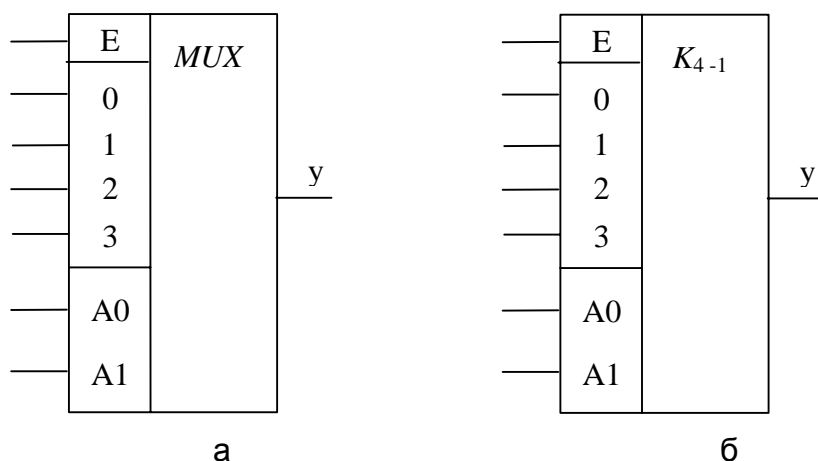


Рис. 3.3. Умовні графічні позначення мультиплексорів

Мультиплексори призначено для забезпечення приймання інформації від одного з декількох джерел (груп джерел).

Мультиплексори широко застосовуються в багатьох пристроях систем контролю й керування на входах регістрів, які приймають інформацію від декількох джерел, на виходах блоків пам'яті при зчитуванні вибраної інформації за однією розрядною шиною, у блоках передання інформації послідовним кодом і т. ін.

Синхронні мультиплексори будуються за схемою, типовий варіант якої зображено на рис. 3.4.

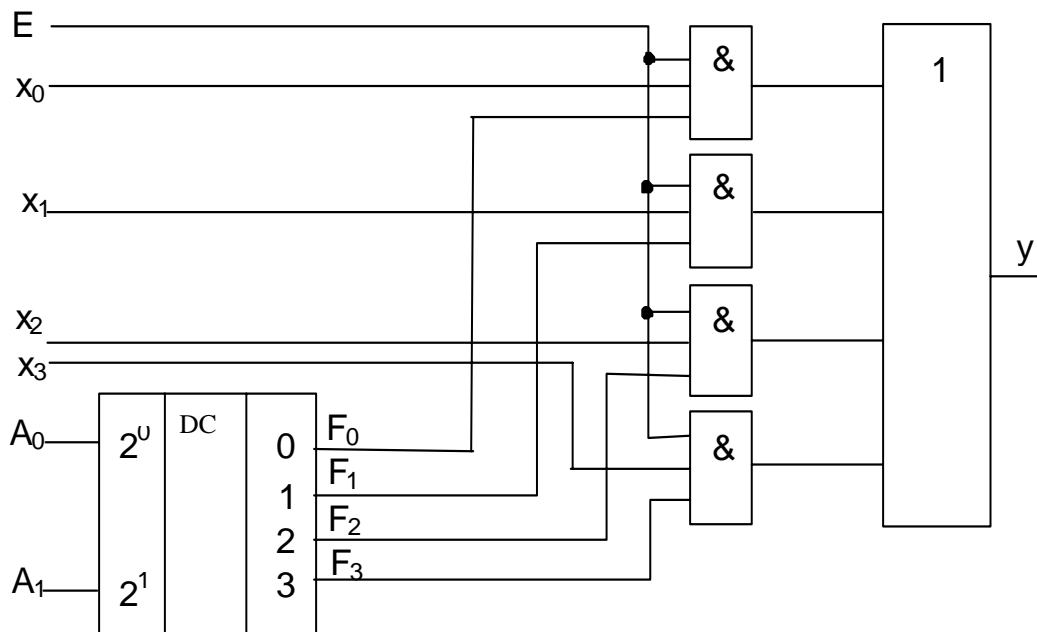


Рис. 3.4. Функціональна схема синхронного мультиплексора

Символами 0, 1, 2, 3 на схемі позначено інформаційні входи мультиплексора, y — інформаційний вихід; A_0 , A_1 — адресні входи; E — керувальний вхід; F_0 , F_1 , F_2 , F_3 — виходи дешифратора.

Дешифратор декодує код, який надходить на адресні входи A_0 , A_1 і задає номер того каналу, з якого інформація має бути передана на вихід Y мультиплексора. На виході дешифратора, який відповідає цьому каналу, формується одиничний сигнал. Сигнал зі збудженого виходу дешифратора надходить на відповідний елемент I та за наявності одиничного синхронізувального сигналу на керувальному вході E забезпечує тим самим передання значення сигналу з вибраного каналу на вихід Y . За відсутності одиничного синхронізувального сигналу інформація на вихід не передається і вихідний сигнал має нульове значення.

У загальному випадку мультиплексори реалізують логічну функцію

$$y(x_0, x_1, \dots, x_{n-1}, A_0, A_1, \dots, A_{m-1}) = x_0 E F_0(A_0, A_1, \dots, A_{m-1}) \vee x_1 E F_1(A_0, A_1, \dots, A_{m-1}) \vee \dots \vee x_{n-1} E F_{n-1}(A_0, A_1, \dots, A_{m-1}), \quad (3.1)$$

де $F_i(A_0, A_1, \dots, A_{m-1})$ — функції, які реалізуються на виходах дешифратора.

Асинхронні мультиплексори відрізняються від синхронних відсутністю керувального входу E і відповідних зв'язків.

3.3. Порівнювальні пристрої

Порівнювальними пристроями називають комбінаційні дискретні пристрої, які порівнюють два n -розрядних коди. Їх призначено для перевірки однаковості двох двійкових кодів чисел для визначення більшого (меншого) з них. Умовне графічне позначення порівнювального пристрою показано на рис. 3.5.

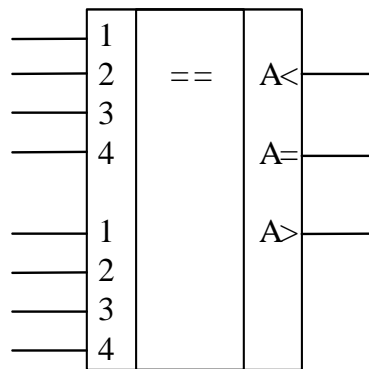


Рис. 3.5. Умовне графічне позначення порівнювального пристрою

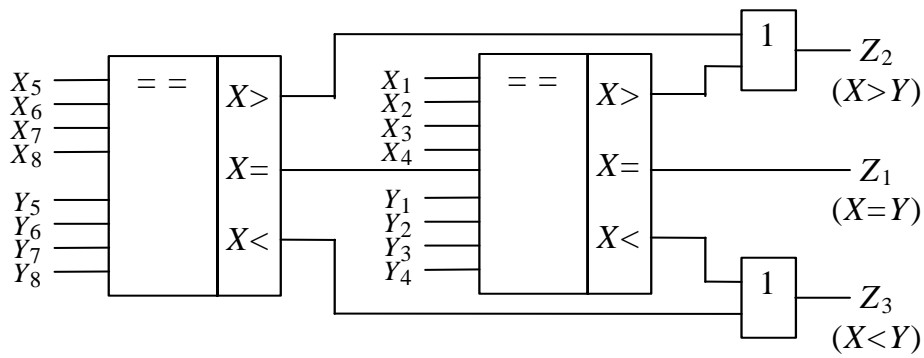
Порівнювальні пристрої набули широкого застосування в цифрових системах для вирішення завдань контролю інформації, при порівнянні значень вихідних сигналів дубльованих каналів, для формування керувальних (інформаційних) сигналів при виході заданих параметрів за межі допустимих величин та ін.

Розглянемо принципи будування порівнювального пристрою, який перевіряє ідентичність кодів (рис. 3.6). Логічний вираз, який описує умови функціонування такого пристрою, можна записати, виходячи з означення. Очевидно, що два двійкові коди однакової довжини будуть однаковими, якщо збігаються значення кожної пари однойменних розрядів.

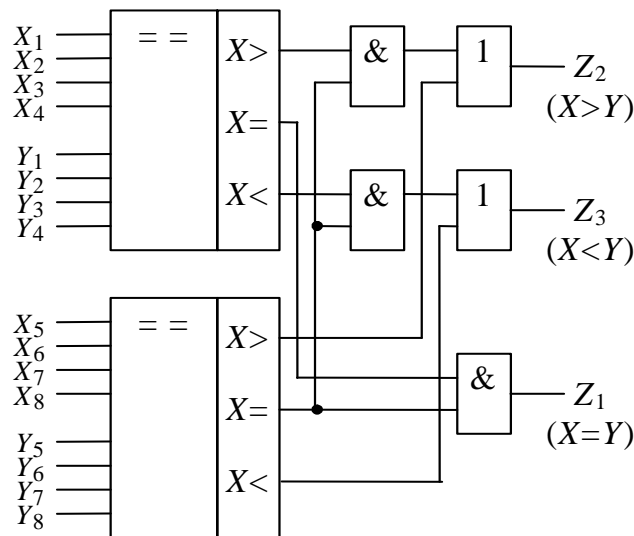
Таким чином, для пари однойменних i -х розрядів має виконуватись умова

$$a_i = x_i y_i \vee \overline{x_i y_i}, \quad (3.2)$$

де x_i, y_i — значення i -го розряду кодів X і Y , що порівнюються.



а



б

Рис. 3.6. Функціональна схема восьмирозрядного порівнювального пристрою:
 а — на чотирирозрядних пристроях з керувальними входами;
 б — на чотирирозрядних пристроях без керувальних входів

Зі свого боку, для вихідного сигналу Z порівнювального пристрою з прямим виходом має виконуватись умова

$$Z = \bigwedge_{i=1}^m a_i. \quad (3.3)$$

Вибір варіанта перетворення логічної функції, яка описує умови функціонування порівнювального пристрою, залежить від розрядності порівнюваних кодів і заданої елементної бази. Більш оптимальну схему порівнювального пристрою для розглянутого прикладу можна отримати, використовуючи елементи суми за модулем два, які є в деяких серіях інтегральних мікросхем.

Схема порівнювального пристрою з інверсними виходом формує одиничний сигнал за умови нерівності двох кодів і описується логічною функцією

$$Z_n = \overline{\bigwedge_{i=1}^n a_i}. \quad (3.4)$$

Особливістю керованих порівнювальних пристроїв є наявність спеціального входу I , завдяки якому здійснюється дозвіл або заборона видачі результатів порівняння (рис. 3.6, б).

3.4. Мажоритарні елементи

Мажоритарним елементом називають типовий дискретний пристрій, що здійснює вибір і передання на вихід значення сигналу, який є переважним на більшості його входів. Мажоритарні елементи набули широкого застосування в різних галузях дискретної техніки при будівництві резервованих пристроїв і систем. Умовне графічне позначення порогових і мажоритарних елементів регламентується. У середині прямокутника позначається логічний поріг: $\geq m$, або $\geq m$ (рис. 3.7, а).

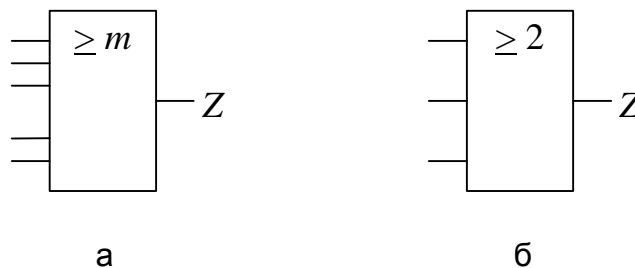


Рис. 3.7. Мажоритарний елемент

Такий запис означає, що одиничний сигнал на виході виникає тільки за наявності m і більше одиничних сигналів на його входах. Найбільшого розповсюдження набули мажоритарні елементи, які реалізують функцію голосування «2 із 3». Умовне графічне позначення такого мажоритарного елемента показано на рис. 3.7, б.

Мажоритарними елементами у загальному випадку реалізується логічна функція n змінних, яка перетворюється на одиницю, якщо дорівнюють одиниці m і більше змінних з n , де m – логічний поріг елемента, що визначається як найближче ціле, яке задовольняє умову

$m \geq \frac{n}{2}$. При $n = 3$, $m = 2$ логічна функція, яка реалізується мажоритарними елементами, має вигляд

$$Y = x_1x_2 \vee x_2x_3 \vee x_1x_3, \quad (3.5)$$

де x_i — вхідні змінні.

Функціональну схему мажоритарного елемента «2 із 3», яку виконано на мікросхемах К155ЛА3 і К155ЛА4, зображено на рис. 3.8.

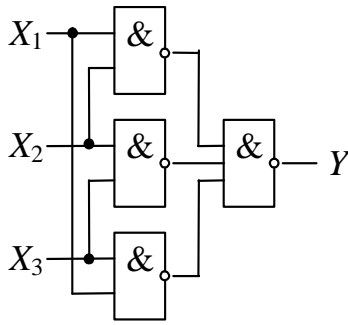


Рис. 3.8. Функціональна схема мажоритарного елемента

3.5. Засоби формування первинної інформації

Узагальнену класифікацію засобів формування первинної інформації показано на рис. 3.9 [11, 13].



Рис. 3.9. Класифікація засобів формування первинної інформації

До датчиків неперервних сигналів належить більшість датчиків для контролю теплоенергетичних параметрів, що зазвичай мають на виході сигнали напруги постійного струму, електрорушійної сили (ЕРС) змінного струму. До цієї групи датчиків належать також датчики частоти й часоімпульсних сигналів.

Датчики дискретних сигналів поділяють на такі підгрупи [1, 11]:

- з цифровим (кодовим) виходом, до яких належать рівнеміри з кодовим диском, лічильники з кодовим виходом, цифрові датчики ваги, часу та ін.;

- позиційних сигналів, до яких належать сигналізатори технологічних параметрів (сигналізатори тиску, витрат, рівня, температури тощо), датчики роботи устаткування, аварійні сигналізатори, пристрої ручного введення позиційних сигналів;

- кількісноімпульсних сигналів, у тому числі датчики кількості заготовок, деталей, вузлів, виробів, інтегральних величин тощо, значення яких отримують шляхом підсумовування імпульсів, кожен з яких відповідає певній кількості речовини або енергії; імпульсні датчики часу.

Периферійні засоби введення первинної дискретної інформації поділяються на групи відповідно до рівня автоматизації процесу формування інформації [2, 6, 7, 11]:

- засоби напіваавтоматичного введення інформації (наприклад, засоби введення інформації з перфокарт, жетонів, ярликів; зчитувальні пристрої з бланків з намагніченою поверхнею, зі стилізованим або магнітним шрифтом);

- засоби ручного введення інформації (наприклад, пристрої і пульти з декадними перемикачами, дисками номеронабирачів, клавіатурою, що видають інформацію в лінію зв'язку; пристрої, у яких одночасно з введенням інформації формуються документи; касові апарати, а також пристрої, у яких окрім формування документа виконуються арифметичні дії з інформацією, що вводиться, наприклад бухгалтерські машинки);

- комбіновані засоби введення інформації, у яких поєднано блоки ручного й напіваавтоматичного введення інформації.

3.6. Засоби перетворення первинної інформації

Засоби перетворення первинної інформації про технологічні процеси в комп'ютерно-інтегрованих виробництвах наведено такими основними групами [11]:

- засоби нормалізації сигналів;

- аналого-цифрові перетворювачі;

— перетворювачі частотних і часоімпульсних сигналів у цифрові коди;

— перетворювачі кодів.

Засоби нормалізації, сигналів призначено для оброблення сигналів від датчиків з метою їх підготовки до аналого-цифрового перетворення. Вони можуть бути як індивідуальними, так і груповими та виконувати деякі операції, найбільш поширеними з яких є зведення різних сигналів до напруги постійного струму; зведення отриманої напруги постійного струму до уніфікованого діапазону; масштабування сигналів; функціональне перетворення (лінеаризація) сигналів.

Зведення сигналів датчиків до напруги постійного струму здійснюється різними способами залежно від типів датчиків. Наприклад, для диференційно-трансформаторних датчиків можуть застосовуватися різні схеми випрямлення сигналів змінного струму; сигнали ерс термопар перетворюють з допомогою мостових схем і потенціометрів і т. ін.

Сигнали зводяться до уніфікованого діапазону з допомогою вимірювальних підсилювачів постійного струму і масштабуються з допомогою спеціальних дільників.

Необхідність лінеаризації сигналів виникає внаслідок того, що в деяких датчиках вихідний сигнал пов'язаний нелінійною залежністю зі значенням контрольованого параметра. Причини такої нелінійності можуть бути різними. Наприклад, під час вимірювання витрат рідин і газів з допомогою диференціальних манометрів вихідний сигнал датчика пов'язаний з обсягом витрат залежністю [11]

$$U_0 = kQ^2, \quad (3.6)$$

де U_0 — сигнал датчика; Q — обсяг витрат; k — коефіцієнт.

Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) можна класифікувати за багатьма ознаками: за схемою входу (одноканальні й багатоканальні), схемою виходу (послідовні й паралельні) і принципом перетворення аналогової величини на код. За останньою ознакою перетворювачі поділяють на три класи: послідовного рахунку, порозрядного зважування, безпосереднього зчитування [1, 9].

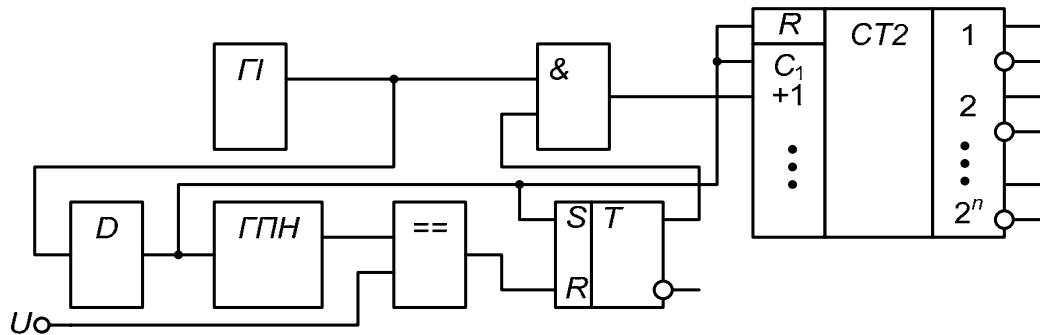
Аналого-цифрові перетворювачі характеризуються такими основними технічними показниками:

— діапазон змінення вхідного сигналу, що визначається кількістю розрядів вихідного коду перетворювачів і вагою найменшого розряду;

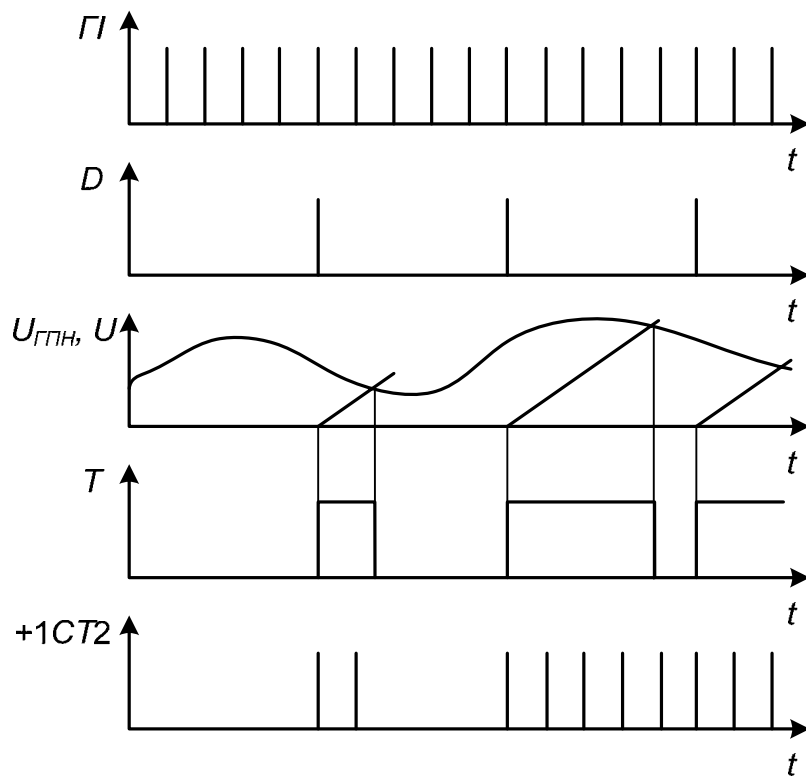
— часові параметри, до яких належать період перетворення сигналу перетворювачем і час окремого квантування;

— точність перетворення, що визначається похибкою квантування сигналу за рівнем, динамічною похибкою, яка виникає внаслідок змінення вхідного сигналу за час квантування, похибкою окремого виміру.

На рис. 3.10 показано функціональну схему перетворювача напруги на код, у якому відбувається виділення часового інтервалу, пропорційного до величини вимірюваної напруги, шляхом порівняння перетвореної напруги з пилкоподібною напругою.



а



б

Рис. 3.10. Аналого-цифровий перетворювач

Такі АЦП застосовують для перетворення постійної напруги на код. Імпульси, які формуються генератором імпульсів (П), через подільник частоти D запускають генератор пилкоподібної напруги (ГПН) і встановлюють тригер T у положення, при якому відкривається елемент І. Імпульси з $П$ надходять у лічильник $CT2$. Коли пилкоподібна напруга досягає значення перетворюваної напруги U_x , сигнал зі схеми порівняння

встановлює тригер T у вихідне положення. Надходження імпульсів у лічильник припиняється.

Часовий інтервал, протягом якого імпульси надходили у лічильник, є пропорційним до величини перетворюваної напруги. На виході лічильника формується двійковий код, числове значення якого пов'язане лінійною залежністю з перетворюваною напругою.

У кожному такті імпульсів з подільника частоти значення лічильника скидається до нульового положення. Як *ГПН* застосовується інтегратор еталонної напруги U_e . Похибка такого АЦП визначається похибкою лінійної напруги ГПН, неточністю спрацювання схеми порівняння й похибкою виміру часового інтервалу.

Функціональні перетворення сигналів можуть здійснюватися в аналоговій формі, наприклад шляхом використання нелінійного за напругою діляника в ланцюзі зворотного зв'язку вимірювального підсилювача. У деяких системах масштабування й функціональні перетворення виконуються в цифровій формі в аналого-цифрових перетворювачах (АЦП) або в засобах оброблення інформації.

Частотні сигнали перетворюються на цифровий код шляхом підрахунку періодів сигналу (імпульсів) за певний інтервал часу або підрахунку імпульсів еталонної високої (порівняно з перетворюваною) частоти, що надійшли за один період проходження перетворюваного сигналу. Часоімпульсний сигнал також перетвориться шляхом підрахунку імпульсів еталонної частоти за час проходження імпульсу.

Потреба в перетворювачах кодів пояснюється тим, що при розробленні різних дискретних пристроїв, призначених для сумісної роботи, складно забезпечити необхідну надійність, швидкодію та інші технічні характеристики, обмежуючись лише одним способом кодування інформації.

3.7. Методи збору первинної інформації від датчиків з неперервними вихідними сигналами

Застосовують такі методи збору первинної інформації від датчиків з неперервними вихідними сигналами [11, 33]:

— з *часовим поділом каналів*, що базуються на комутації датчиків, тобто на почерговому підімкненні вихідних ланцюгів датчиків до групових перетворювачів, у тому числі до аналого-цифрових;

— *мультипліковані компенсаційні*, що базуються на одночасному порівнянні сигналів датчиків з розгорненим компенсувальним сигналом з допомогою нуль-органів, розташованих в індивідуальних ланцюгах датчиків (коли компенсувальний сигнал під час зростання дорівнює вимірюваному, відповідний нуль-орган спрацьовує і зчитується значення кодованого компенсувального сигналу разом з адресою датчика (нуль-органу)).

На рис. 3.11 показано типовий склад системи збору первинної інформації від датчиків з часовим поділом каналів.

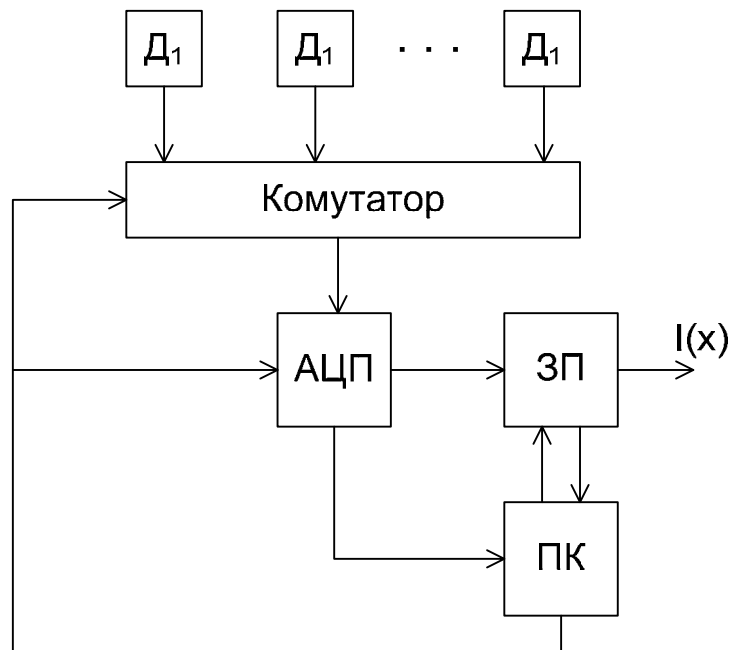


Рис. 3.11. Схема збору первинної інформації з одноступінчастою комутацією

Датчики (D_1, \dots, D_n) командами від засобів керування (ЗК) підмикаються комутатором до групового перетворювача (П), вихід якого з'єднано лінією зв'язку з аналого-цифровим перетворювачем (АЦП). Цифрові значення з виходу АЦП формуються в масив і надходять до запам'ятовувальної пристрою (ЗП). При цьому ЗП і ПК можуть бути як спеціалізованими засобами проміжної пам'яті й керування, так і комп'ютером, який разом з вирішенням інших завдань керує збором і формуванням масивів первинної інформації.

Опитування датчиків може бути циклічним або програмним, коли залежно від потрібної для вирішення завдання інформації програмно вибирається необхідний датчик.

Система збору неперервної інформації виконує такі операції:

— перетворення неперервної в часі величини на послідовність її значень, заданих в точках відліку через інтервали часу, що визначаються циклом роботи комутатора (квантування параметра за часом);

— перетворення значень параметрів на цифрові коди, виходячи з вибраного кроку аналого-цифрового перетворення (квантування параметрів за рівнем);

— узгодження показників швидкодії комутатора, перетворювача й АЦП з вимогами до частоти опитування датчиків.

Принципова можливість заміни (без втрати інформації) безперервної функції скінченною кількістю її значень у точках відліку

витікає з відомої теореми відліків, відповідно до якої суміжні відліки мають здійснюватися через часові інтервали Δt :

$$\Delta t = 1/(2F_c), \quad (3.7)$$

де F_c — максимальна частотна складова неперервної функції з обмеженим спектром.

Під час аналого-цифрового перетворення сигнал піддається квантуванню за рівнем, тобто округлюється вимірювана величина шляхом заміни її найближчою величиною, яка є кратною кроку квантування (значенню молодшого розряду аналого-цифрового перетворювача). Вибір кроку квантування можна зробити за заданою середньою квадратичною похибкою перетворювача.

Так, при точному вимірюванні, коли середнє квадратичне відхилення вимірюваної випадкової величини $X(t)$ є значно більшим за крок її квантування ΔX , щільність розподілу $f(X)$ похибки квантування ΔX на інтервалі квантування X_0 є постійною (розподіл є рівномірним), тобто

$$f(\Delta x) = \begin{cases} \alpha, & \text{при } -0,5X_0 \leq \Delta x \leq +0,5X_0; \\ 0, & \text{при } -0,5X_0 > \Delta x > +0,5X_0; \end{cases} \quad (3.8)$$

де $\alpha = 1/X_0$.

Узгодження вимог щодо частоти опитування датчиків зі швидкодією об'єктів КІВ досягається застосуванням відповідних методів опитування. При циклічному опитуванні (див. рис. 3.11) з постійними інтервалами часу між однаковими операціями час циклу опитування τ_0 визначається з виразу

$$\tau_0 = (\tau_n + \tau_a + \tau_3)m, \quad (3.9)$$

де m — кількість комутованих датчиків; τ_n — час перемикавання комутатора та дії перетворювача (час підготовки каналу); τ_a — час аналого-цифрового перетворення; τ_3 — час затримки між закінченням аналого-цифрового перетворення сигналу попереднього датчика і виданням команди на комутацію наступного.

При заданих значеннях τ_n , τ_a , τ_3 і необхідному значенні τ_0 в схемі комутації можна варіювати тільки кількістю датчиків, і якщо m є великим, то необхідно застосовувати декілька систем збору інформації. На практиці має місце нерівність $\tau \ll \tau_n$, що дає змогу зменшити τ_0 шляхом застосування в системі декількох групових

перетворювачів (рис. 3.12) і двоступінчастого комутатора (першого ступеня K_1 і другого ступеня K_2). Таке рішення забезпечує поєднання часу підготовки різних каналів.

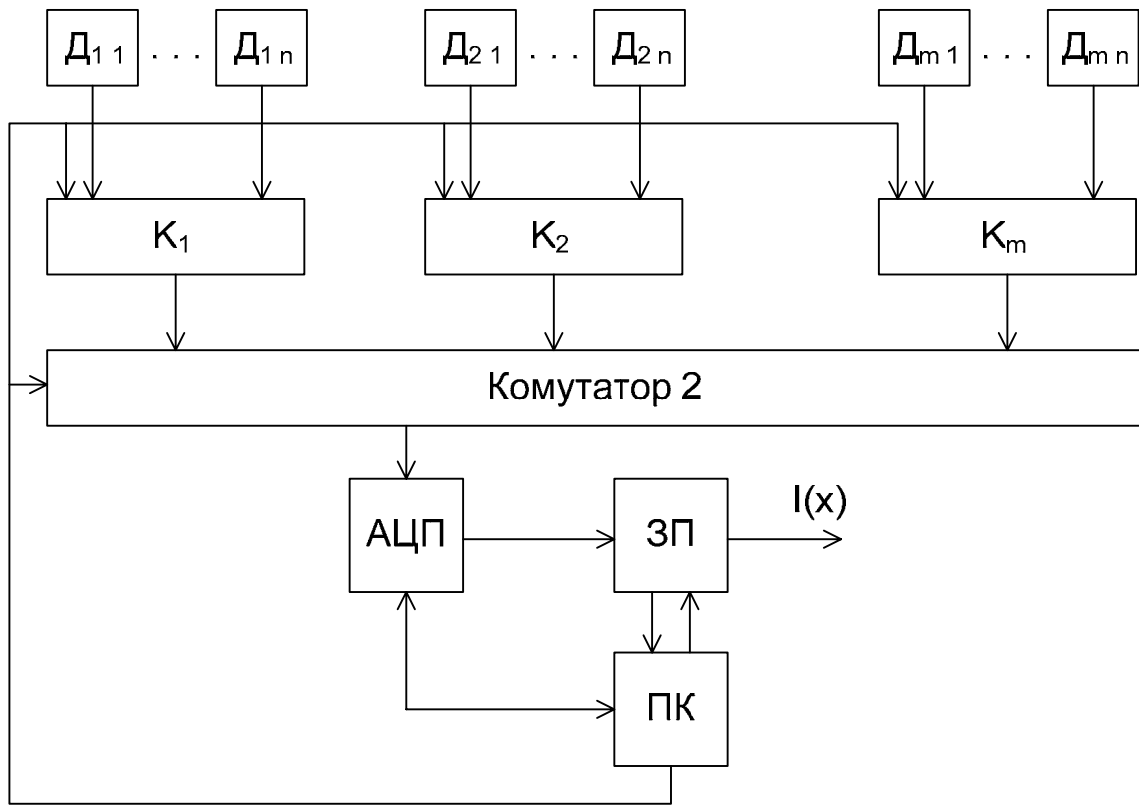


Рис. 3.12. Схема збору первинної інформації з двоступінчастою комутацією

Прикладом системи збору інформації, одержаної шляхом комутації каналів, може бути система введення аналогової інформації (САВ) [11, 13]. У цій системі датчики різних типів з допомогою комутаторів підмикаються до нормувальних підсилювачів, у яких сигнали трансформуються до меж стандартного діапазону 0...10 В напруги постійного струму.

Для сигналів змінного струму використовують спеціальні блоки випрямлення. Уніфікований сигнал по загальній лінії зв'язку передається до цифрового вимірювального пристрою. Цей пристрій кодує і видає отримані значення до засобів оброблення інформації. Для підвищення швидкості передачі інформації передбачено можливість використання декількох групових нормувальних підсилювачів і двоступінчастої схеми комутації.

Систему розраховано для роботи з термопарами, термометрами опору, диференційно-трансформаторними датчиками, феродинамічними датчиками, датчиками з вихідними сигналами постійного струму, датчиками ерс постійного струму, датчиками з вихідними сигналами постійної напруги, датчиками з вихідним сигналом змінної напруги.

Датчики з пневматичним вихідним сигналом підмикаються до пристрою через індивідуальні або групові перетворювачі.

Швидкість опитування датчиків прийнято тотожною 100 точкам за секунду при чотирьох групових нормувальних підсилювачах. До системи можна підімкнути максимум 512 датчиків. Датчики підмикаються до чотирьох комутаторів (кожний комутатор підмикає 128 датчиків).

3.8. Методи збору первинної інформації від дискретних датчиків і пристроїв уведення

Широке застосування в підсистемах КІВ знаходять такі методи збору дискретної інформації:

- з використанням проміжних носіїв інформації (напівавтоматичне збирання);
- з переданням інформації по лініях зв'язку (автоматизований збір).

Якщо носіями інформації є документи у вигляді спеціальних бланків, заповнених стилізованим або магнітним шрифтом, або машинні носії у вигляді перфострічок і перфокарт, їх передають до засобів оброблення так само, як і інші документи. Застовують такі варіанти введення інформації з носіїв:

- безпосередньо до комп'ютера;
- перезаписування на автономному пристрої до довготривалої пам'яті на магнітних стрічках або магнітних дисках, які потім підмикаються під час оброблення інформації до комп'ютера.

Для оброблення інформації при автоматизованому зборі необхідно передавати від засобів ручного введення не менше одного повідомлення. На приймальному кінці повідомлення має прийняти свій початковий вигляд. У разі використання паралельного способу передання повідомлень немає необхідності перетворювати передане повідомлення. Навпаки, у разі використання засобів послідовної передачі (наприклад, телеграфного каналу) на приймальному пункті потрібне перетворення послідовного коду на паралельний. Таке перетворення можливе шляхом або зсуву сигналів у приймальному регістрі або комутації прийнятих сигналів до відповідних розрядів регістру прийому з наступним паралельним виданням коду.

За формою зображення у просторі й часі коди поділяють на послідовні й паралельні. Послідовний код — це комбінація імпульсів (або їхніх еквівалентів) і пауз у часі (рис. 3.13, а) в одному просторовому елементі (проводі, радіолінії тощо). На папері коди записують в послідовній формі: кожному розряду — нове місце в різні моменти часу.

Час тривалості послідовного коду (рис. 3.13, а)

$$t = n\tau_1 + n\tau_2 = n(\tau_1 + \tau_2), \quad (3.10)$$

де τ_1 — довжина інформаційного сигналу (імпульсу); τ_2 — довжина паузи; n — довжина коду.

Якщо сума $\tau_1 + \tau_2$ дорівнює періоду імпульсів T , то $t = nT$. При паралельному коді (рис. 3.13, б) його кожний елемент зображується окремим просторовим елементом (проводом, ланцюгом, лінією, радіолінією тощо).

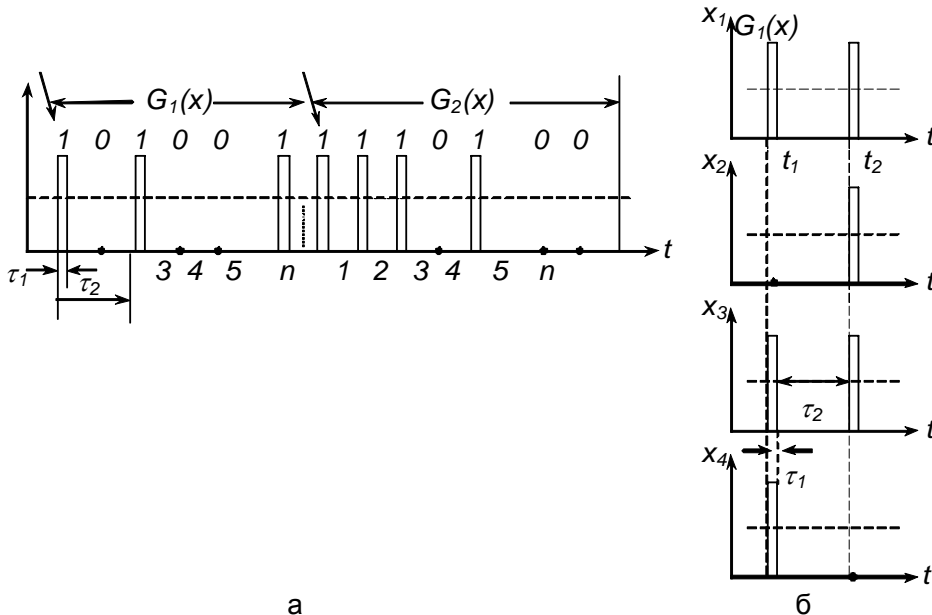


Рис. 3.13. Послідовні й паралельні коди

Час тривалості паралельного коду (рис. 3.13, б) має такий вигляд:

$$t = \tau_1 + \tau_2. \quad (3.11)$$

Якщо $\tau_1 + \tau_2 = T$, то $t = T$.

З порівняння виразів (3.10) і (3.11) випливає, що тривалість послідовного коду в n разів більша за тривалість паралельного коду, тобто паралельна форма коду має менший час передання, але потребує великих просторових (апаратних) витрат.

У СКК КІВ використовуються як послідовні, так і паралельні форми зображення кодів: під час приймання й передання інформації використовуються послідовні коди, а під час зберігання, оброблення й зображення — паралельні. Перетворення кодів однієї форми на іншу можна виконати, наприклад, на регістрі зсуву (рис. 3.14) або на кон'юнкторах.

Перетворювач на регістрі зсуву містить вузол керування 1 і регістр зсуву 2. Вузол керування містить формувач початку перетворення 3, генератор імпульсів 4, тригер керування 5, кон'юнктор 6, лічильник 7, дешифратор 8. На вхід $G(x)$ надходить послідовний код. При надходженні

першого розряду коду на вході $G(x)$ формувач 3 устанавлює тригер 5 в одиничний стан. Це забезпечує проходження синхронізувальних імпульсів з генератора 4 через кон'юнктор 6 на лічильник 7 і на вхід синхронізації (вхід C) регістра зсуву 2.

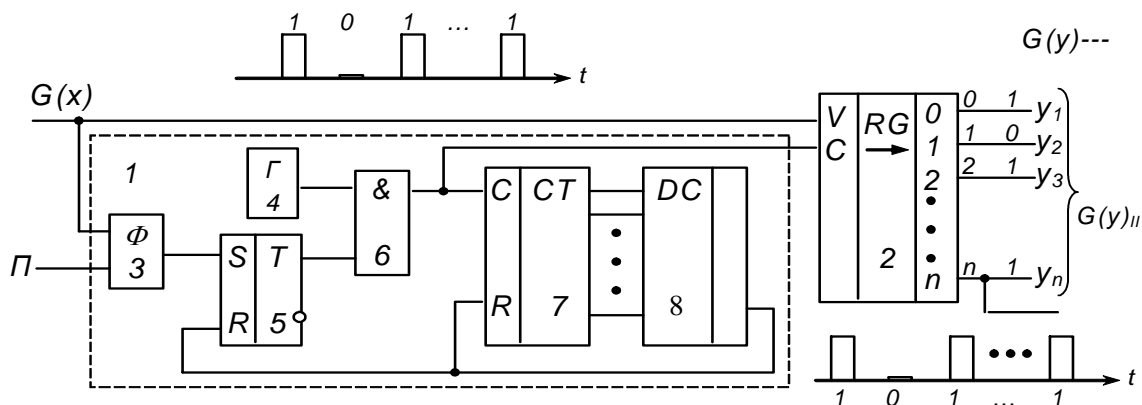


Рис. 3.14. Кодоперетворювач на регістрі зсуву

Під час надходження кожного синхронізувального імпульсу на вхід C регістра 2 в його перший (молодший) розряд записується інформація, яка надходить на вхід V . Значення першого (молодшого) розряду записуються в другий (наступний) розряд. Лічильник 7 і дешифратор 8 забезпечують формування на виході кон'юнктора 6 кількості імпульсів, яка дорівнює довжині коду.

При збігу кількості імпульсів з довжиною n коду дешифратор 8 (в окремому випадку це один кон'юнктор, входи якого з'єднано з певними прямими й інверсними виходами лічильника 7) формує сигнал, яким тригер керування 5 і лічильник 7 приводяться у початковий стан.

На виходах $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ регістра 2 формується паралельний код. Перший елемент послідовного коду, який надходить на вхід V регістра 2, у паралельному коді знаходиться на виході y_n , а останній — на виході y_1 . Для перетворення паралельного коду, який міститься в регістрі 2, на послідовний необхідно на його вхід C подати n імпульсів. Ці імпульси формують вузол керування 1 після надходження керувального сигналу на вхід Π формувача 3. Послідовний код формується на виході y_n .

З опису роботи перетворювача на регістрі зсуву випливає, що він забезпечує перетворення як послідовного коду на паралельний, так і паралельного на послідовний. Такий перетворювач є універсальним. Принциповою особливістю цього перетворювача під час роботи в режимі приймання (перетворення послідовного коду на паралельний) є те, що період надходження елементів коду ($t = T$) на вхід V регістра 2 має дорівнювати періоду синхронізувальних імпульсів, які надходять на вхід C регістра 2.

Під час надходження першого розряду коду на всі кон'юнктори вузла комутації 9 він надійде тільки на вхід S_1 регістра 2, тому що тільки на другому вході кон'юнктора 10 буде сигнал з виходу 1 дешифратора 8. Під час надходження другого розряду коду на кон'юнктори вузла комутації 9 він надійде тільки на вхід S_2 регістра 2 через кон'юнктор 11, тому що тільки на другому його вході буде сигнал з виходу 2 дешифратора 8 і т.д.

Паралельний код зберігається в регістрі 2 і формується на його виходах $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$. Характерною особливістю перетворювача є те, що він може забезпечувати запис будь-якого розряду послідовного коду в будь-який розряд регістра 2. Це досягається відповідним з'єднанням других входів кон'юнкторів 9 з виходами дешифратора 8. Недоліком цього перетворювача є те, що він тільки перетворює послідовний код на паралельний і не перетворює паралельний код на послідовний.

На рис. 3.15 зображено схему перетворювача паралельного коду на послідовний.

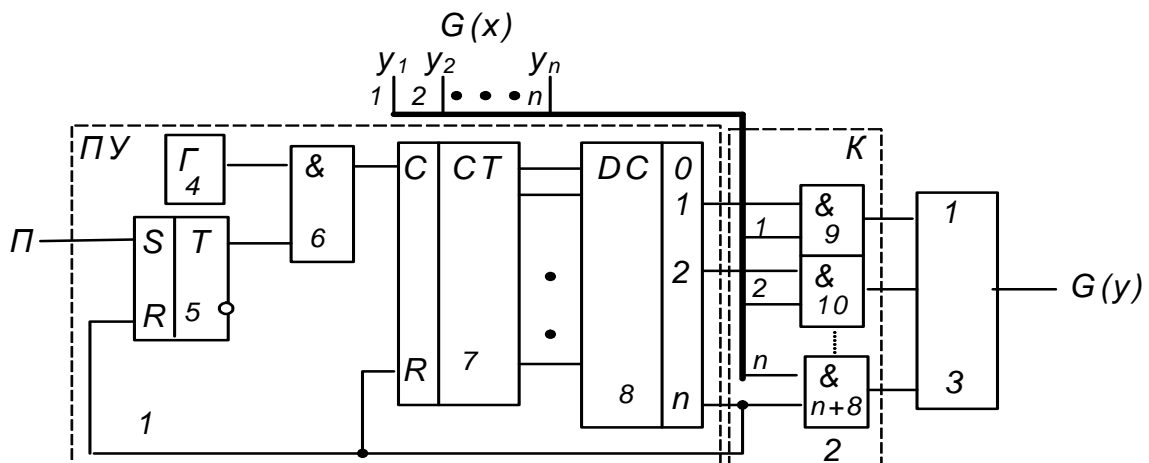


Рис. 3.15. Перетворювач паралельного коду на послідовний

Цей перетворювач містить вузол керування 1, вузол комутації 2 і диз'юнктор 3. Паралельний код надходить на перші входи кон'юнкторів вузла комутації 2, другі входи яких з'єднано з виходами дешифратора 8 вузла керування 1.

За наявності паралельного коду на входах y_1, y_2, \dots, y_n і надходження сигналу пуску на тригер керування 5 імпульси з генератора 4 через кон'юнктор 6 надходять на лічильник 7. Змінення кодів на виходах лічильника 7 забезпечує через дешифратор 8 керувальні сигнали на виходах 1, 2, ..., n вузла керування.

Цим здійснюється послідовне підйомнення входів y_1, y_2, \dots, y_n вузла 2 комутації через кон'юнктори 9, 10, ..., n + 8 і диз'юнктор 3 на вихід $G(y)$, тобто перетворення паралельного коду на послідовний. Закінчення перетворення забезпечується з'єднанням виходу n дешифратора 8 із входами R тригера керування 5 і лічильника 7. Перетворювач забезпечує тільки перетворення паралельного коду на послідовний.

Вибір способу передання повідомлень для конкретної системи контролю й керування має здійснюватися з урахуванням конструктивних особливостей усього комплексу засобів системи. Проте можна зазначити деякі особливості способів автоматичного введення з огляду на їх апаратурну реалізацію. Кількість ліній передання є найбільшою для паралельного способу передання і мінімальною — для послідовного. З іншого боку, швидкість передання інформації в першому випадку є вищою, а засоби приймання — простішими. Таким чином, паралельний спосіб передання є доцільним при малих відстанях розміщення засобів ручного введення від приймального пристрою та при обмеженій кількості пристроїв. Послідовне передання має переваги при великих відстанях, послідовно-паралельне — при внутрішньозаводському обміні інформацією.

При незалежному переданні інформації окремими символами вимоги до засобів ручного введення спрощуються, підвищується загальна пропускна здатність системи, при цьому немає необхідності вводити до її складу таких дорогі засоби пам'яті, як реєстри.

Як канали зв'язку для передання алфавітно-цифрової інформації використовуються наявні телефонні (телеграфні) лінії зв'язку, а також виділені телефонні й спеціальні канали зв'язку. При використанні наявних ліній зв'язку інформація передається послідовним кодом і перетворюється з допомогою стандартної апаратури комутації на паралельний код. У цьому випадку застосовується радіальний спосіб з'єднання засобів ручного введення відносно СКК КІВ. При використанні виділених каналів можливими способами з'єднань є радіальний, кільцевий і змішаний.

Розглянемо приклад системи введення дискретної інформації, призначеної для збору, передання на відстань і введення в центральне обладнання СКК КІВ [11]. До системи можна підмикати: блок ручного введення цифрової інформації (БРВ); датчики підрахування штучної продукції; сигналізатори рівня; лічильники електроенергії із умонтованими в них числоімпульсними датчиками; інші датчики, у тому числі позиційні й цифрові. Датчики мають на виході «сухий контакт» або падіння напруги від 0 до 12 В. Датчики дискретної інформації й блоки ручного введення розташовують в цехах, лабораторіях, складах та інших приміщеннях не більш ніж за 300 м від виносних блоків комутації. Довжина магістралей, що з'єднують блоки комутації із засобами контролю й керування КІВ, становить не більше 3 км.

Центральний пристрій СКК КІВ спрямовує в систему дискретного введення (СДВ) адресу опитуваного датчика або групи датчиків. У СДВ ця адреса дешифрується. У блоці комутації вмикається реле, яке передає до магістралей сигнали з вибраних джерел інформації. Сигнали надходять на приймальні елементи, підсилюються, контролюються і запам'ятовуються реєстрами. У комп'ютер надходить сигнал переривання, якщо інформація є готовою до

видання. Комп'ютер сприймає цю інформацію, після чого цикл опитування вже за іншою адресою може повторюватись. Уся інформація, що отримується від датчиків, передається до центрального пристрою СКК КІВ без якого-небудь попереднього її оброблення.

Періодичність опитування визначається кількістю дискретних датчиків, вільним часом центрального пристрою СКК, тривалістю опитування одного датчика й вимогами виробництва. Щоб інформація від датчиків кількісно-імпульсних сигналів не загубилася, у СДВ необхідно передбачити буферну пам'ять імпульсних сигналів по одному елементу на кожен датчик, з яких ця інформація надалі буде зчитуватися.

3.9. Методи і засоби видачі керувальних дій

На відміну від засобів збору інформації для видання керувальних дій на об'єкт керування використовуються джерела інформації у вигляді засобів оброблення й запам'ятовування інформації СКК КІВ, а приймачі у вигляді виконавчих пристроїв розосереджено по усьому об'єкту контролю й керування. Розраховані значення коригувальних і керувальних дій видаються з комп'ютера у вигляді цифрових кодів.

Виконавчі пристрої розраховано на різні види вхідних сигналів, що потребує перетворення інформації, її проміжного зберігання, тобто створення розвиненої системи видачі керувальних дій.

До складу системи видачі керувальних дій належать засоби перетворення й проміжного зберігання командної інформації [11, 14, 16, 31]. До перетворювачів інформації відносять:

- цифро-аналогові перетворювачі з електричним вихідним сигналом;
- цифро-аналогові перетворювачі із пневматичним вихідним сигналом (кодові електропневматичні перетворювачі);
- електропневматичні перетворювачі;
- перетворювачі цифрового коду на кількісно-імпульсний сигнал;
- перетворювачі цифрового коду на часоімпульсний сигнал;
- підсилювачі сигналів.

З усіх наявних різновидів цифро-аналогових перетворювачів найбільшого поширення набули перетворювачі двійкового коду на напругу або струм. Двійковий цифровий код можна подати у вигляді суми:

$$N = \sum_{i=1}^n a_i \cdot 2^{-i} = a_1 \cdot 2^{-1} = a_2 \cdot 2^{-2} + \dots + a_n \cdot 2^{-n}, \quad (3.12)$$

де $a_i = \{0, 1\}$.

Принцип цифро-аналогового перетворення полягає в підсумовуванні аналогових величин, пропорційних вагам розрядів вхідного цифрового коду, розрядні коефіцієнти яких дорівнюють одиниці ($a_i = 1$).

Залежно від того, перетвориться цифровий код безпосередньо на аналогову величину або спочатку перетвориться на проміжний сигнал з наступним перетворенням на вихідну величину, розрізняють ЦАП із прямим і проміжним перетворенням. Прямі цифро-аналогові перетворювачі залежно від алгоритму оброблення розрядів двійкового коду поділяються на паралельні й послідовні.

Частіше застосовуються ЦАП паралельної дії, у яких усі розряди двійкового коду одночасно подаються на схему підсумовування, тобто відбувається просторовий поділ розрядів. Розглянемо схему й принцип дії паралельного перетворювача. На рис. 3.16 показано схему перетворювача двійкового коду на напругу з ваговими резисторами.

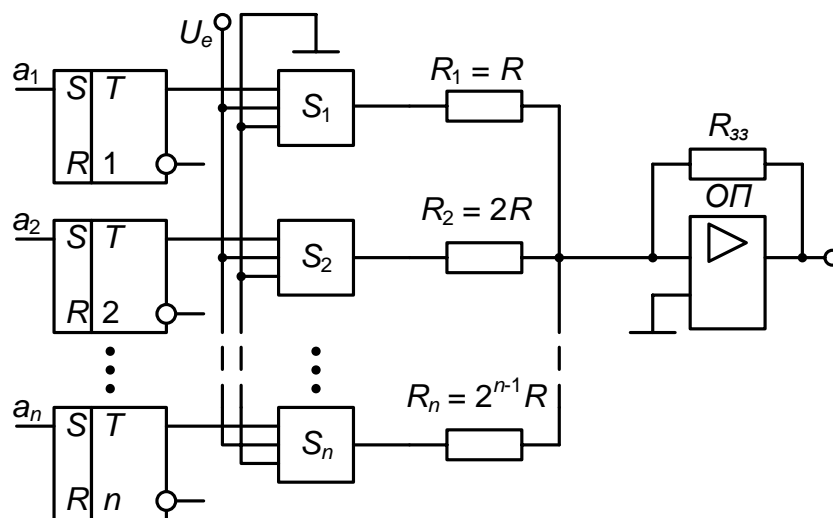


Рис. 3.16. Схема цифро-аналогового перетворювача

Вхідний код надходить на тригери T регістра, що керують станом ключів S . Якщо $a_i = 1$, то ключ S_i підмикає резистор R_i до джерела еталонної напруги, у протилежному випадку – до нульової шини.

Величини опорів резисторів змінюються за двійковим законом, тобто $R_i = R \cdot 2^{i-1}$. Струм, що надходить в підсумовувальну точку операційного підсилювача (ОП), залежить від значення вхідного коду і визначається виразом

$$I = \sum_{i=1}^n \frac{U_e}{R_i} a_i = \frac{2U_e}{R} \sum_{i=1}^n a_i 2^{-i} = \frac{2U_e}{R} N. \quad (3.13)$$

Операційний підсилювач перетворює струм I на вихідну напругу, при цьому з допомогою резистора зворотного зв'язку R_{33} виробляється

необхідне масштабування вихідної напруги:

$$U_{вих} = R_{33}I = 2U_eNR_{33}/R. \quad (3.14)$$

При значній кількості розрядів перетворюваного коду в схемі використовується широкий діапазон номіналів розрядних резисторів. Це є недоліком схеми, тому що при значному діапазоні розсіюваних потужностей складно витримати двійкове співвідношення між опорами резисторів. Для уникнення цього недоліку застосовують перетворювачі двійкового коду на напругу з резистивною сіткою $R-2R$, у якій застосовують два номінали опорів.

Схема такого перетворювача складається з n однакових каскадів. Кожен каскад становить для джерела живлення U_e навантаження, що дорівнює $3R$, а вихідний опір перетворювача є постійним, не залежить від значення коду на вході перетворювача і дорівнює $2R/3$.

Коефіцієнт передання напруги від цього каскаду до наступного дорівнює $1/2$. Таке значення коефіцієнта ділення напруги реалізується внаслідок відповідного розташування каскаду.

Так, наявність в i -му розряді одиничного сигналу створює на вході ОП складову напруги, яка дорівнює $U_e/2^m$. Одним із основних елементів, що визначають точність і швидкодію розглядуваних перетворювачів, є ключі, які приєднують джерело еталонної напруги до опорів схеми. При інтегральному виконанні транзисторних ключів необхідно враховувати їхній опір у замкнутому стані.

Наявність ключів у схемі впливає на її швидкодію, тому що при їх перемиканні струм, який проходить в резисторах, змінює напрям і необхідний час на перезарядження паразитних ємностей опорів. Підвищити швидкодію ЦАП можна шляхом зменшення опорів резисторів, але це призводить до збільшення навантажувального струму еталонних джерел, а також до впливу на точність перетворення залишкових параметрів ключів.

Сигнали (електричні й пневматичні) керувальних дій передаються по лініях зв'язку з використанням відповідної телемеханічної апаратури. Для проміжного зберігання цифрової інформації використовуються спеціальні регістри на безконтактних і контактних елементах і буферні запам'ятовувальні пристрої, а для аналогових сигналів — пневматичні елементи пам'яті й елементи пам'яті електричних сигналів.

При реалізації технологічних процесів у КІВ широко застосовуються наступні методи видачі керувальних дій [11, 34]:

- за адресами виконавчих пристроїв з використанням індивідуальних або групових перетворювачів;
- груповий.

На рис. 3.17 зображено спрощену блок-схему системи видачі керувальних дій, побудовану з використанням методу видачі інформації за адресами виконавчих пристроїв з використанням індивідуальних перетворювачів [11].

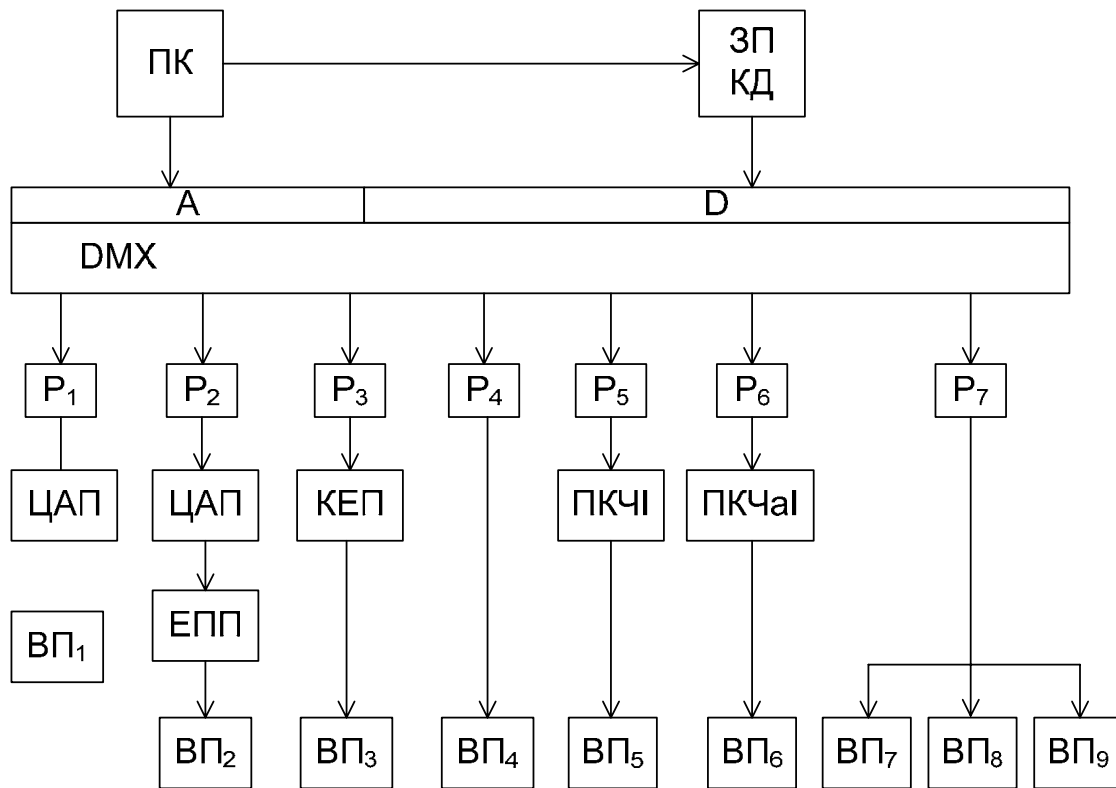


Рис. 3.17. Структурна схема системи видачі керувальних дій

З пристрою оброблення інформації СКК КІВ цифрові значення керувальних дій надходять до спеціального обладнання керувальних дій. Потім їх значення розподіляються з допомогою комутатора цифрових каналів в індивідуальні регістри P1–P7, які можна віддалити на значну відстань. На блок-схемі показано сім індивідуальних каналів видачі керувальних дій на виконавчі засоби різних типів.

Цифрові значення керувальних дій, які занесено в регістри, перетворюються залежно від типу виконавчого пристрою й прийнятої схеми перетворення і видаються до виконавчих пристроїв (ВП).

У першому каналі цифровий код з регістра перетворюється з допомогою індивідуального цифро-аналогового перетворювача на електричний сигнал (струм, напругу). Далі сигнал подається до електричного виконавчого пристрою ВП₁.

Цифрове значення в регістрі P₁ зберігається до наступного коригування завдання. Таким чином, регістр P₁ виконує функції індивідуального цифрового запам'ятовувального пристрою.

У другому каналі сигнал від ЦАП перетвориться електропневмоперетворювачем (ЕПП) на пневматичний сигнал, що подається до пневматичного виконавчого пристрою (ВП₂). Третій канал відрізняється від другого тим, що тут відбувається пряме перетворення цифрового коду на пневматичний сигнал з допомогою кодового електропневматичного перетворювача (КЕП).

У четвертому каналі передбачається використання цифрового виконавчого пристрою, наприклад цифрового соленоїдного виконавчого механізму. У п'ятому каналі цифрове значення з регістра Р₅ перетвориться з допомогою перетворювача код — кількісно-імпульсний сигнал на послідовність імпульсів, які подаються на виконавчий засіб крокового типу (ВП₅). У шостому каналі застосовано перетворювач код — часоімпульсний сигнал (ПКЧал).

Як виконавчий пристрій 6 може використовуватися виконавчий механізм, що має привід з постійною швидкістю обертання. Регістр Р₇ використовується для видання сигналів на позиційні виконавчі пристрої (ВП₇), кількість яких дорівнює кількості двійкових розрядів в регістрі Р₇.

У п'ятому, шостому й сьомому каналах запам'ятовує виконавчі дії безпосередньо сам виконавчий пристрій, що зберігає свій стан до наступного коригування.

Контрольні запитання

1. Назвіть типові комбінаційні пристрої.
2. Наведіть приклади перетворювачів та їхні функціональні схеми.
3. Побудуйте функціональну схему мажоритарного елемента «3 з 5».
4. Дайте означення кодоперетворювача й мультиплексора.
5. Наведіть приклади використання кодоперетворювача.
6. Наведіть приклади використання мультиплексорів.
7. Наведіть приклади застосування АЦП і ЦАП.
8. Які чинники визначають точність аналого-цифрового перетворення?
9. Оцініть швидкості аналого-цифрового перетворення.
10. Обґрунтуйте напрямки вдосконалення ЦАП.
11. Назвіть методи видачі керувальних дій.
12. Наведіть спрощену блок-схему системи видачі керувальних дій з використанням індивідуальних перетворювачів.
13. Яким чином може здійснюватися перетворення цифрового коду на пневматичний сигнал?
14. Яким чином може здійснюватися видача керувальних сигналів на позиційні виконавчі пристрої?
15. Який сигнал необхідно подавати на електричний виконавчий пристрій?

Частина 2. МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

4. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ КОНТРОЛЮ І ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

4.1. Місце контролю у функціонуванні комп'ютерно-інтегрованих виробництв

Ефективність функціонування КІВ значною мірою визначається тим, наскільки повно при виборі методів і засобів контролю було враховано особливості зазначених систем як об'єктів контролю [10, 15]. Без урахування цих особливостей КІВ майже неможливо визначити для кожної з них значення і місце контролю в керуванні її функціонуванням. Специфіка великих систем як об'єктів контролю впливає на вибір методів і видів контролю і показників якості їх функціонування, а також відображається в принципах формалізації і змістовного опису процесів контролю, синтезування функцій працездатності великих систем [13, 16, 17, 24, 29, 30, 33]. Проектування засобів контролю систем КІВ має розпочинатися із вирішення саме цих питань.

Зі зростанням обсягу виробництва інтенсивно збільшуються потоки оброблюваної інформації, причому в загальному випадку обсяг інформації збільшується приблизно пропорційно квадрату кількості виробленої продукції. Вимоги до якості й швидкості передання й перероблення інформації все більше підвищуються. Для підприємств, що належать до замкнутого виробничого циклу, є характерними значна територіальна розосередженість і ієрархічна структура. Тому зростає значення централізації управління й узгодженості роботи систем різного рівня.

Якщо з яких-небудь причин хоч б одна з таких систем не виконує покладених на неї функцій, то це призводить до відхилення виробничого процесу від оптимального проходження або ж взагалі до неприпустимого його порушення. Для запобігання втратам і несприятливим наслідкам необхідно своєчасно отримувати інформацію щодо правильності виконуваних системою функцій. Комп'ютерно-інтегровані виробництва як великі системи в цілому, а також окремі підсистеми, що належать до них, блоки, вузли й елементи можуть виконувати покладені на них функції в тому випадку, якщо вони мають властивість збереження працездатності впродовж заданого інтервалу часу в певних умовах експлуатації, тобто якщо мають необхідну безвідмовність.

Для забезпечення й підтримки необхідного рівня безвідмовності систем під час експлуатації необхідно проводити спеціальні заходи, а саме:

- спрощувати структурні схеми окремих пристроїв і системи в цілому;
- застосувати елементи з гарантованою безвідмовністю;
- зменшувати навантаження елементів і забезпечувати стабільність умов експлуатації СКК КІВ;

— застосовувати структурну надмірність (резервування) вузлів і елементів.

З допомогою реалізації першого методу безвідмовність апаратури не можна значно підвищити. Це пояснюється тим, що простота схем не може бути більша за певний рівень, оскільки СКК та її пристрої мають вирішувати цілком певні завдання.

Сучасні системи продовжують ускладнюватися, оскільки постійно ускладнюються вирішувані ними завдання. Причому системи зазвичай ускладнюються швидше, ніж зменшується інтенсивність відмов елементів.

Підвищення безвідмовності елементів веде до значного ускладнення технології і як наслідок — до непропорційного підвищення їхньої вартості. Сучасні технології не можуть при розумній їхній вартості забезпечити необхідну безвідмовність елементів, яка б дала змогу створювати з них пристрої з необхідними надійнісними характеристиками. Тому застосування елементів з дуже малою інтенсивністю відмов може виявитися економічно недоцільним.

У деяких випадках шляхом незначного зменшення вимог до безвідмовності можна у декілька разів зменшити вартість розроблення й виготовлення системи при невеликому збільшенні вартості її експлуатації. Проте в структурі КІВ існують настільки відповідальні підсистеми, що необхідний рівень їхньої безвідмовності має бути забезпечено, незважаючи на велику вартість.

Експериментальні дані свідчать про те, що завдяки зниженню навантаження можна зменшити інтенсивність відмов елементів на один-два порядки. Так, наприклад, зменшуючи коефіцієнт навантаження резисторів (відношення фактичної потужності до номінальної для цього опору) від 1 до 0,4 при температурі 40 °С, можна зменшити інтенсивність відмов на порядок. Такого самого ефекту можна добитися для транзисторів, зменшуючи коефіцієнт навантаження від 0,3 до 0,1 при температурі, зменшеній до 60 % від номінальної. Такий метод збільшення безвідмовності елементів є дуже ефективним. Проте сьогодні елементи майже в усіх схемах працюють з гранично мінімальними навантаженнями. Зазвичай коефіцієнт навантаження елементів не перевищує 0,5...0,8, а у відповідальних пристроях його доведено до 0,1...0,3. Недоцільно, щоб елементи працювали з меншими навантаженнями.

Для збільшення надійності великих систем застосовують різні методи резервування. Проте можливості резервування також є обмеженими. Чим більшою є кратність резервування, тим меншою буде його відносна ефективність. Так, одно-, дво-, три- і десятиразове гаряче резервування одного елемента дає збільшення середнього часу між відмовами порівняно з нерезервованим елементом відповідно в 1,5; 1,8; 2,1 і 3 рази. Можливості загального навантаженого резервування аналізувати недоцільно, оскільки таке резервування є менш ефективним, ніж елементне. Резервування заміщенням потребує значного ускладнення

апаратури. До того ж створення високонадійних перемикальних пристроїв сьогодні є однією з найбільш серйозних проблем. Реалізація значної структурної надмірності призводить до великого подорожчання апаратури й ускладнення її експлуатації.

Наведені методи збільшення надійності апаратури спрямовано лише на боротьбу з відмовами її елементів. Водночас у великих системах, як і у будь-якій апаратурі, можуть виникати також збої, які призводять до порушення правильності функціонування систем через спотворення інформації. Для усунення наслідків збою слід відновлювати не апаратуру, як це робиться при виникненні відмови, а інформацію, спотворену збоями.

Особливо схильними до збоїв є засоби дискретної дії взагалі та комп'ютери зокрема, а також засоби передання інформації дискретними сигналами. У дискретних пристроях інтенсивність збоїв може досягати $10^{-2} \dots 10^{-4} \text{ г}^{-1}$ на один транзистор, у ненадмірній ЕОМ — 10^{-2} г^{-1} . Імовірність спотворення одного символу в кодограмі при переданні дискретного сигналу по кабельному телефонному каналу зв'язку коливається в межах $10^{-3} \dots 10^{-4} \text{ г}^{-1}$. Експериментальні дані свідчать про те, що в цифровій апаратурі збої мають значно більшу питому вагу, ніж відмови [23, 28, 29].

Безвідмовність дискретних пристроїв можна підвищити введенням структурної надмірності, при якій виходить систем, що знаходяться в резервованому з'єднанні, об'єднуються логічним відновлюваним органом (мажоритарним елементом). Таке резервування можна реалізувати і на нижчому рівні. Для виявлення відмови у будь-якому з каналів достатнім є дублювання, а відновлення інформації є можливим для трьох і більше паралельно працюючих каналів. Таке резервування є дуже ефективним, особливо для боротьби зі збоями, проте потребує великої надмірності. Його ефективність значно зменшується при виникненні відмови.

Для збільшення безвідмовності роботи систем можна використати також інформаційну надмірність. У цьому випадку надмірну інформацію призначено як для виявлення, так і для виправлення спотворень в робочій інформації. Як приклад наведемо використання коригувальних надмірних кодів або багатократного повторення вихідного коду при переданні інформації по каналах зв'язку.

Як відомо, для виправлення багатократних спотворень потрібна дуже велика інформаційна надмірність. Використання в системах передання кодів, що виявляють спотворення, у поєднанні зі зворотним зв'язком також пов'язане з великою надмірністю. Це саме є характерним для багатократного передання вихідного коду. Однак інформаційна надмірність призводить до надмірності структурної, що ускладнює систему і зменшує її безвідмовність. Інформаційна надмірність є ефективною тільки за умови усунення наслідків збоїв. Зменшити вплив відмов майже неможливо.

З розглянутого легко зробити висновок, що можливості забезпечення необхідної ефективності функціонування систем тільки з допомогою

реалізації прямих методів збільшення безвідмовності апаратних засобів є обмеженими. Разом із застосуванням цих методів необхідної ефективності можна досягти з допомогою своєчасного відновлення пристроїв, що відмовили, і спотвореної інформації, що циркулює в них. Для реалізації відновлення необхідно мати відомості щодо стану системи, а також якості перероблення, передання й зберігання в ній інформації. Ці відомості можна отримати тільки з допомогою контролю [13, 16], який дає змогу своєчасно виявляти й усувати відмови і несприятливі наслідки, спричинені ними. Потрібних значень безвідмовності й ефективності систем найдоцільніше добиватися шляхом реалізації прямих методів збільшення безвідмовності апаратних засобів спільно з їх контролем і подальшим усуненням відмов і наслідків збоїв.

Для підтвердження значних можливостей комплексного вирішення завдання розглянемо такий приклад. Припустимо, що в структуру СКК КІВ увімкнено два однакові комп'ютери, що працюють паралельно, причому середній час між відмовами кожного дорівнює T . Якщо порушення керованого технологічного процесу станеться тільки у разі відмови обох комп'ютерів, то за відсутності відновлення середній час існування справності повністю зарезервованого варіанта буде становити $T_1 = 1,5T$. Якщо ж при відмові одного елемента (комп'ютера) його відновлення починається без зволікання, причому середній час відновлення дорівнює t_e , то середній час роботи двох комп'ютерів знаходять за виразом [13]

$$T_2 = 1,5T + T^2/(2t_e). \quad (4.1)$$

При $T = 100$ год і $t_e = 0,5$ год отримуємо $T_1 = 150$ год, $T_2 = 10150$ год. Звернемо увагу на те, що значення T_2 обернено пропорційне до тривалості середнього часу відновлення. При $t_e = 0,1$ год, $T_2 = 50150$ год. Наведені вище співвідношення є справжуваними при експоненційному законі розподілу часу відповідно між відмовами й відновленням кожного з комп'ютерів з інтенсивністю $\lambda = 1/T$ і $\mu = 1/t_e$ і за умови, що перемикальні пристрої й апаратура контролю є абсолютно надійними. Перемикання з основного комп'ютера на резервний відбувається миттєво.

Наведений приклад свідчить про ефективність відновлення працездатності. Причому чим меншим є час t_e , тим більшою буде ефективність відновлення. Відновлення є ефективним лише для систем, відмова яких не призводить до несприятливих наслідків, якщо її усувають за час, що не перевищує задану величину τ . За певних умов порівняно невеликий резерв часу τ дає можливість забезпечити ту саму ймовірність виконання системою завдання, що й при дворазовому або навіть триразовому структурному резервуванні. За обумовлених вище умов середній час між відмовами такої системи визначається виразом

$$T(\tau) = (T + t_e) e^{\tau/t_e} - t_e. \quad (4.2)$$

Якщо $t_g = \tau$, то $T(\tau) \approx 2,7T$. Ефект від уведення резерву часу τ збільшується зі зменшенням значення t_g . Отже, доцільно якомога більше зменшувати значення t_g .

Ефективність відновлення буде тим вищою, чим менше часу буде витрачено на нього. Досвід експлуатації великих систем свідчить про те, що за відсутності спеціальних засобів перевірки основну частку часу відновлення становить час, який витрачається на визначення місця відмови. Ця частка іноді становить 70–80 % від загального часу відновлення. Тому для зменшення часу відновлення передусім необхідно зменшувати час контролю, що можна досягнути застосуванням спеціальних методів і засобів контролю з високим ступенем автоматизації.

З розглянутого випливає, що контроль дає змогу реалізувати на практиці відновлення апаратних засобів й інформації, забезпечити необхідну безвідмовність і довговічність систем під час їх експлуатації, а також необхідну достовірність передання й перероблення інформації. Завдяки організованому певним чином контролю підвищується пристосованість системи, що контролюється, до попередження, виявлення й усунення відмов, тобто покращує її ремонтпридатність. Отже, відновлення з малим часом контролю й ліквідації наслідків відмов і збоїв є потужним і в деяких випадках єдиним методом підтримання необхідного рівня надійності систем на етапі експлуатації і забезпечення достовірності перероблення й передання інформації.

4.2. Поняття технічного стану об'єкта

Контроль у загальному випадку – це визначення стану, у якому перебуває той або інший об'єкт [10, 13, 18, 25]. Визначимо поняття технічного стану об'єкта (системи). Під технічним станом об'єкта (рис. 4.1) розуміється сукупність властивостей, притаманних йому в певний момент часу за певних умов зовнішнього середовища.

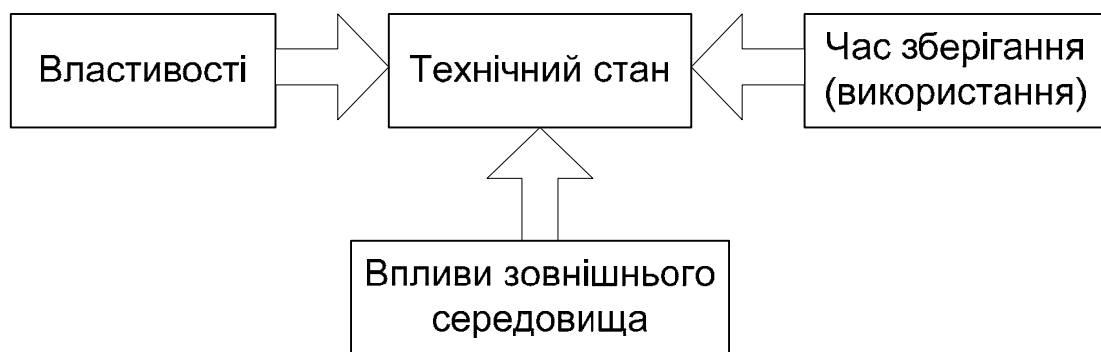


Рис. 4.1. Поняття технічного стану об'єкта КІВ

Вимоги до властивостей об'єкта й до умов зовнішнього середовища, у яких його використовують і в яких визначається його стан, містяться в нормативно-технічній документації.

Слід зазначити, що визначення технічного стану (ТС) узгоджується з поняттям стану як філософської категорії, яке відображає специфічну форму реалізації буття та фіксує деякий момент стійкості щодо змін, розвитку й руху матеріальних об'єктів у певний момент часу й за певних умов. При цьому поняття «момент часу» для визначення технічного стану має відносний характер, оскільки йому може відповідати і зазвичай відповідає інтервал часу, протягом якого не відбувається помітних змін щодо властивостей об'єкта і здійснюється їх фіксація під час розпізнання технічного стану.

Важливим атрибутом поняття «технічний стан» є зовнішнє середовище, оскільки властивості об'єкта суттєво залежать від умов його експлуатації (наприклад, властивості систем літального апарата (ЛА) можуть бути надто різними під час чергування літального комплексу, проведення пуску ЛА і його польоту). Будь-яка система має об'єктивні властивості незалежно від суб'єкта, який вивчає їх. Отже об'єкт завжди перебуває в деякому технічному стані незалежно від того, відомо будь-що про нього чи ні.

Сукупність властивостей об'єкта характеризується сукупністю значень і ознак, які відповідають цим властивостям. Отже, технічний стан об'єкта можна охарактеризувати множиною (множинами) змінних, значення яких визначаються в процесі розпізнання. Таким чином, технічний стан є досить емним і різностороннім поняттям.

Класифікацію типів технічних станів систем показано на рис. 4.2.

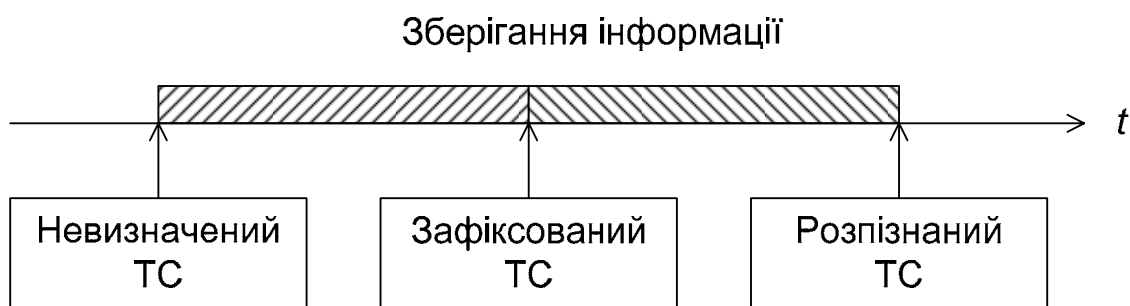


Рис. 4.2. Типи технічних станів

Через технічний стан об'єкта можна розпізнати *невизначений*, *зафіксований* і *розпізнаний* ТС [10]. Перехід від невизначеного до зафіксованого ТС здійснюється шляхом збору інформації щодо властивостей об'єкта — визначення значень змінних, які характеризують ці властивості.

Подальший перехід до розпізнання ТС здійснюється на основі аналізу зібраної інформації та порівняння отриманих значень параметрів і

властивостей системи із наданими вимогами, які містить нормативно-технічна документація (НТД).

Отже, *зафіксований ТС* — це сукупність властивостей, зафіксованих у певний відрізок часу за певних умов зовнішнього середовища. *Розпізнаний ТС* — це зафіксований ТС, який порівнюється з вимогами до властивостей об'єкта, що містяться в НТД.

З огляду на застосування об'єкта ознаки, які його характеризують, не є рівноцінними і можуть поділятися на функціональні, параметричні й зовнішні. Перші з них характеризують функціональне призначення об'єкта, другі — його енергетичні, інформаційні й фізико-хімічні властивості, а треті — зовнішній вигляд і оформлення об'єкта. Відповідно до цього ТС поділяють відносно процедур розпізнавання на три види: *функціональний*, *параметричний* і *зовнішній* (рис. 4.3).

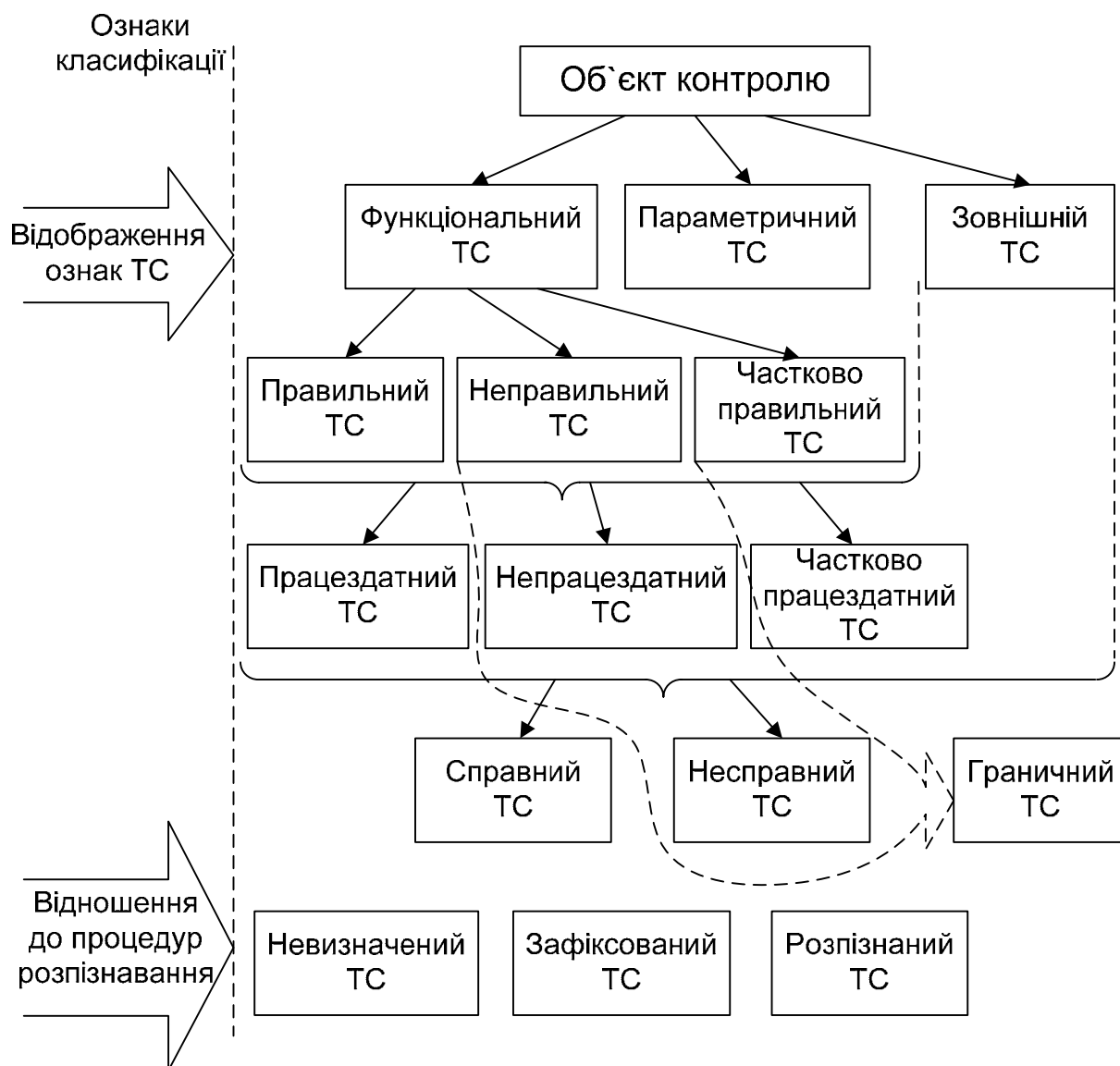


Рис. 4.3. Класифікація технічних станів

Функціональний ТС — це технічний стан, який відображає функціональне призначення об'єкта. Функціональний ТС може бути *правильним* (якщо всі функціональні ознаки об'єкта відповідають вимогам НТД), *неправильним* або *частково правильним*.

Параметричний ТС — це технічний стан, який відображає енергетичні, інформаційні й фізико-хімічні властивості об'єкта. На основі спільного оцінювання функціонального й параметричного станів зафіксований стан може визначатися як *працездатний*, *непрацездатний* або *частково працездатний*.

Працездатний стан — це такий стан об'єкта, при якому значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати задані функції, відповідають вимогам нормативно-технічної документації.

Частково правильний і частково працездатний стани є проміжними класами розпізнаних ТС. Умови перебування об'єкта в станах такого типу наведено в нормативно-технічних документах (НТД).

Ці стани можуть використовуватися в системах, які мають назву живучих. У таких системах допускається часткова втрата виконуваних функцій або часткове погіршення параметрів системи. Наприклад, багатопроцесорні системи, у яких під час відмови одного або декількох процесорів продуктивність зменшується нижче за початковий встановлений рівень, здатні продовжувати виконання певних функцій.

Зовнішній ТС — це технічний стан, який відображає зовнішній вигляд і оформлення об'єкта. На основі спільного оцінювання функціонального, параметричного й зовнішнього станів ТС поділяється на *справний* і *несправний*. У справному стані об'єкт відповідає всім вимогам НТД.

Частковим випадком неправильного, непрацездатного і несправного технічних станів є *граничний* стан, при якому подальше застосування об'єкта за призначенням є неприпустимим або недоцільним. Відновлення об'єкта в цьому випадку є неможливим або недоцільним.

Технічні стани об'єкта залежно від значень, які характеризують його параметри й ознаки, можуть поділятися на класи станів. Ознака (ознаки), за якою здійснюється такий поділ, має назву *діагностичної ознаки*.

З поняттям технічного стану також тісно пов'язані поняття *помилки*, *дефекту* й *відмови*.

Помилка — це розбіжність результатів виконання деякого процесу з відомим результатом.

Дефект — це джерело (фізична причина) окремої невідповідності властивостей об'єкта вимогам НТД. Слід зазначити, що дефект може мати фізичний характер, а може бути наслідком помилки, яка виникла під час проектування. Розпізнання останнього типу дефектів — надзвичайно складне.

Відмова — це подія, яка являє собою порушення працездатного стану об'єкта.

4.3. Класифікація видів і методів контролю

Види контролю доцільно класифікувати відповідно до схеми, зображеної на рис. 4.4 [10, 15].



Рис. 4.4. Класифікація видів контролю підсистем КІВ

1. Залежно від того, якою є кінцева мета проведення контролю, його можна класифікувати як контроль працездатності і як діагностичний контроль. При контролі працездатності мета перевірок зводиться до своєчасного виявлення фактів відсутності або наявності несправності в системі, що перевіряється, і спотворень у вигляді збоїв у вихідній інформації. При діагностичному контролі перевірку проводять з метою установлення місця й причини несправності або характеру відмови, прийняття рішення щодо працездатності засобів діагностування.

Ці види контролю основані на різних методах перевірки, які по-різному технічно реалізуються й використовуються в різних умовах. У загальному випадку контроль працездатності є складовою частиною діагностичного контролю.

Принципово майже завжди можна здійснити діагностичний контроль, не маючи інформації про те, чи є працездатною система. Однак для реалізації діагностичного контролю необхідно більше часу. Тому зазвичай спочатку виконують контроль працездатності, як простіший і такий, що потребує менших витрат часу, потім, якщо це необхідно, проводять діагностичні перевірки.

2. За повнотою перевірок контроль працездатності класифікується як повний, якщо з достатньою для практики точністю можна вважати, що ймовірність виявлення несправності або збою дорівнює одиниці, і як неповний (частковий), якщо ймовірність менша за одиницю.

Аналогічно під повним діагностичним контролем будемо розуміти такий контроль, при якому ймовірність визначення місця й причини несправності (збою) дорівнює одиниці, а під частковим — при якому ця ймовірність менша за одиницю.

За глибиною перевірок контроль системи може бути не лише контролем працездатності й діагностичним контролем, але й комбінованим. В останньому випадку для однієї частини системи він дає змогу отримати тільки дуальне оцінювання стану СКК (працездатна або непрацездатна), а для іншої — вирішує завдання діагностування з певною глибиною (до підсистем, блоків, каналів, вузлів, модулів і т. ін.).

Якщо перевірити необхідно всі етапи обміну інформацією (зберігання, передання й оброблення інформації в системі), то контроль називають наскрізним. При наскрізному контролі немає розриву в ланцюзі перевірки інформації, що циркулює.

Тому стійку і нестійку відмови можна виявити на будь-якому етапі роботи системи. При місцевому (локальному) контролі перевіряється тільки окреме обладнання системи або окремі етапи її роботи.

3. За ступенем автоматизації контрольних операцій (ступенем участі оператора) контроль може бути:

— *неавтоматизованим* (ручним), якщо підімкнення вимірювальних приладів (спеціальних контрольних пристроїв) або перемикання апаратних засобів в контрольний режим оператор здійснює вручну, а порівняння

вимірюваних параметрів з номінальними значеннями, прийняття рішення щодо працездатності СКК і технічного діагностування також здійснюються людиною-оператором;

— *напіваавтоматичним*, якщо деяка частина операцій з підключення й перемикання вимірювальних приладів (контрольних пристроїв) або переведення апаратури в контрольні режими реалізується автоматично, а порівняння вимірюваних параметрів з номінальними значеннями, прийняття рішення щодо працездатності СКК і технічного діагностування здійснюються людиною-оператором;

— *автоматичним*, якщо уся послідовність контрольних операцій, у тому числі формування сигналу щодо працездатності апаратури й пошуку місця несправності або збою, здійснюється без втручання людини.

4. За часом реалізації контрольних операцій розрізняють періодичний контроль, що реалізується через певні інтервали часу, і оперативний (безперервний) контроль, який здійснюється безперервно під час виконання системою завдання.

5. За послідовністю реалізації контрольних операцій контроль можна класифікувати як паралельний, коли окремі пристрої системи контролюються одночасно, і послідовний, коли пристрої перевіряються один за одним. У системі може бути реалізовано також послідовно-паралельний контроль, при якому частина об'єкта контролюється послідовно, а частина — паралельно.

6. За типом конструктивної реалізації контроль може бути *внутрішнім і зовнішнім*. Внутрішній контроль здійснюється засобами, які є складовою частиною об'єкта перевірки. При зовнішньому контролі стан об'єкта перевірки оцінюється з використанням пристроїв, які не належать до його структури, тобто є зовнішніми відносно СКК.

Зазвичай зовнішні засоби перевірки конструктивно реалізуються у вигляді автономної системи контролю, яку можна використати для перевірки різних об'єктів. Якщо систему призначено для перевірки об'єктів одного класу, то її називають спеціалізованою, а якщо для об'єктів декількох класів — універсальною. Прикладом перших є спеціалізовані автомати контролю, других — системи контролю, побудовані на базі комп'ютерів. Зовнішній контроль зазвичай є періодичним.

7. Система контролю може бути рухомою або стаціонарною (нерухомою). У першому випадку її транспортують від одного об'єкта контролю до іншого, а в другому — стаціонарно встановлюють. При цьому можливе розташування системи контролю як безпосередньо в об'єкті контролю, так і на значному віддаленні від нього з використанням спеціальної лінії зв'язку. Відповідно до цього контроль може бути безпосереднім або дистанційним (телемеханічним).

Перевірка окремих пристроїв (блоків, каналів) може здійснюватись як незалежно, так і спільно при їх взаємодії за схемою, що відповідає робочому режиму. У першому випадку контроль називають автономним, а

в другому — комплексним. Перевірку окремих самостійних об'єктів складної системи у деяких випадках називають об'єктовим контролем.

8. Керування контролем системи і його виконання може здійснюватися з єдиного центру. У цьому випадку контроль називають централізованим. При децентралізованому контролі окремі вузли системи перевіряють незалежно один від одного.

9. За типом вирішального правила контроль може бути детермінованим (нерандомізованим) або ймовірнісним (рандомізованим). При детермінованому контролі кожній допустимій реакції ставиться у відповідність цілком певний допустимий стан об'єкта, що перевіряється. Таких рішень може бути стільки, скільки є вихідних реакцій. Між множиною реакцій і множиною допустимих станів існує взаємно-однозначна відповідність.

При ймовірнісному контролі припускається, що з кожною реакцією пов'язана стохастична (імовірнісна) матриця, відповідно до умовної ймовірності якої приймається унікальне остаточне рішення щодо стану об'єкта контролю. При такому контролі кількість допустимих станів перевищує кількість різних вихідних реакцій.

10. Залежно від режимів роботи системи, що перевіряється, розрізняють контроль в робочому режимі й профілактичний контроль. *Контроль в робочому режимі* здійснюється під час виконання системою своїх функцій. *Профілактичний контроль* призначено для виявлення стану системи в цілому та окремих її пристроїв під час профілактичних робіт. Профілактичний контроль можна провести при нормальному й «утрудненому» режимах роботи системи.

Стан системи може оцінюватися як у поточний момент, так і з прогнозуванням. Контроль в «утрудненому» режимі роботи системи дає змогу виявити елементи, які перебувають на межі відмови, і своєчасно їх замінювати. При цьому нестійкі відмови можуть стати стійкими, що полегшує їх виявлення і локалізацію.

Такий режим можна створити шляхом вибору відповідних вхідних дій і умов роботи системи. Так, наприклад, можна змінити за відповідним законом (зменшення або збільшення) напругу живлення. Можливі також впливи на апаратуру з допомогою різноманітних імітаторів температурних, вібраційних та інших чинників.

Доцільно також зазначити, що режим контролю може бути статичним або динамічним. В останньому випадку технічний стан системи оцінюється на основі аналізу характеру перехідних процесів, а в першому — після завершення цих процесів.

Як приклад статичного режиму контролю можна назвати перевірку безперервної системи керування з використанням частотного методу, а динамічного режиму — перевірку її з допомогою часового методу (за характером змінення перехідної характеристики при заданій вхідній дії).

4.4. Методи контролю функціонування підсистем комп'ютерно-інтегрованих виробництв

Залежно від принципів формування й отримання ознак, за сукупністю яких оцінюється стан системи, усі наведені види контролю можна реалізувати прямими й непрямими методами [10]. Перші з них базуються на формуванні наведених ознак за значеннями основних параметрів, що характеризують якість функціонування контрольованої системи, а другі — на використанні для цієї мети побічних явищ, що виникають при її функціонуванні.

До прямих належать програмні й апаратні методи контролю, раціональне поєднання яких дає змогу значною мірою автоматизувати процес проведення перевірок. При програмному контролі кількісні значення наведених вище ознак визначаються завчасно та зберігаються в системі контролю або виробляються робочою схемою об'єкта контролю під час виконання ним основного завдання. При апаратному контролі їх визначають спеціально призначеним для цієї мети надмірним пристроєм, що переробляє відповідно до алгоритму робочу вхідну інформацію.

До непрямих належать методи, що базуються на реалізації людиною-оператором евристичних вирішальних правил за сукупністю її візуального, акустичного й тактильного сприйняття, а також методи, основані на комплексному оцінюванні результатів інструментальних вимірювань різних видів сигналів (акустичних, електромагнітних, вібраційних і т. ін.), побічних явищ, що належать до супутних у процесі функціонування системи.

Програмний контроль базується на реалізації спеціальних програм і логічних методів, що контролюють роботу системи в цілому або окремих її пристроїв і елементів. Залежно від способу організації програмний контроль підрозділяється на програмно-логічний, алгоритмічний і тестовий. Програмно-логічний контроль організовується на основі використання надмірної початкової і проміжної інформації. Найпростіше реалізувати програмно-логічний контроль з допомогою багаторазового перероблення інформації з наступним порівнянням отриманих результатів. Для виявлення спотворення інформації досить забезпечити двократне її перероблення.

Виправлення інформації можливе тільки в тому випадку, якщо кількість циклів її перероблення становить не менше трьох (мажоритарний принцип). Зазвичай при реалізації цього методу система контролю автоматично забезпечує третій цикл (і більше) перероблення інформації, якщо результати перших двох не збіглися.

Контроль правильності перероблення інформації можна здійснити з допомогою перевірки попадання отриманого результату в заздалегідь встановлену область. Для контролю комп'ютера під час розв'язання рівнянь можна підставляти в ці рівняння отримані результати, перевіряючи, чи перетворюються вони на тотожність. З цією ж метою у

багатьох випадках доцільно за отриманим результатом обчислити вихідні дані (зворотне прорахування) і порівнювати їх із заданими.

Перевагою методів програмно-логічного контролю є те, що їх використання не потребує спеціальних засобів. Тому їх можна застосовувати в будь-якій системі з програмним керуванням, з їх допомогою можна надійно виявляти збої.

До недоліків цього виду контролю можна віднести: зниження продуктивності системи, що для багатьох випадків виявляється неприпустимим; неможливість виявлення несправності; виявлення збоїв не в момент їх виникнення, а наприкінці етапу розв'язання задачі; неможливість локалізації місця виявленої помилки; витрати певного ресурсу пам'яті для зберігання програм; можливість застосування контролю лише за наявності неспотворених початкових даних, що зберігаються в оперативному запам'ятовувальному пристрої, або за умови використання постійних запам'ятовувальних пристроїв.

Алгоритмічний контроль є різновидом програмно-логічного контролю. При алгоритмічному контролі на основі аналізу алгоритмів завдань, що реалізуються цією системою, будується так званий усічений алгоритм, який використовується для контролю. Усічений алгоритм має бути за своєю довжиною і часом виконання приблизно на порядок меншим від основного алгоритму. У такому випадку продуктивність системи знижується приблизно на 10 % при незначному (близько 1 %) збільшенні місткості пам'яті програм. В інших випадках алгоритмічний контроль за своїми властивостями буде аналогічним програмно-логічному контролю.

Алгоритмічний контроль найдоцільніше застосовувати для елементів керувальних систем, які вирішують певний клас завдань керування реальними об'єктами. У цьому випадку розроблені основні й усічені алгоритми й програми, що їх реалізують, використовуються тривалий час. Алгоритмічний контроль так само, як і програмно-логічний, дає змогу виявляти збої з імовірністю, близькою до одиниці. Виявлення несправностей залежить від виду основного й усіченого алгоритмів. Якщо вони відрізняються один від одного за характером виконуваних операцій, то ймовірність виявлення несправностей зменшується. До недоліків алгоритмічного контролю, окрім тих, що є характерними для програмно-логічного контролю, можна віднести обмеженість його застосування, оскільки не для кожного алгоритму можна побудувати усічений алгоритм.

Тестовий контроль — це перевірка систем з допомогою випробувальних програм. При виконанні тесту комп'ютер здійснює певну послідовність дій над початковими числами, порівнює отримані результати й у разі їх невідповідності фіксує помилку. Основне завдання при складанні тестів — найбільш повно охопити систему, її засоби та окремі вузли й режими їх роботи шляхом підбирання відповідних прикладів і поєднань операцій.

На відміну від програмно-логічного контролю тестовий контроль не дає

змоги встановити правильність виконання системою основної програми, оскільки на час «прогону» тесту вирішення покладених на систему завдань переривається. Тому тестовий контроль під час роботи системи може використовуватися тільки періодично. Він має важливе значення при відновленні систем і перевірці їх функціонування.

Випробувальні програми, які використовуються при тестовому контролі, за характером роботи поділяються на контролювальні й діагностичні тести. Контролювальні тести використовують для визначення факту наявності несправності в системі або пристрої. Діагностичні тести призначено для знаходження елемента або групи елементів, у яких є несправність. Контролювальні тести доцільно розробляти на основі принципу областей, що розширюються, а діагностичні — на основі областей, що звужуються.

У разі використання принципу областей, що розширюються, тест будується так, щоб до перевірки послідовно долучалися все нові елементи, а вже перевірені застосовувалися для контролю або контролювалися з більшою повнотою. Відповідно до принципу областей, що звужуються, кожен наступний етап перевірки охоплює тільки ту групу елементів, у якій за результатами попереднього етапу є відмова. Таке звуження області контролю триває доти, доки не буде забезпечено необхідну глибину діагностування.

Перевага тестового контролю, під час якого реалізуються контролювальні й діагностичні тести, полягає в тому, що він дає змогу автоматизувати процес виявлення й пошуку несправностей; звести до мінімуму час на їх усунення; не потребує додаткових засобів, окрім деякої місткості пам'яті програм. До недоліків тестового контролю належать: неможливість виявлення збоїв, оскільки в момент перевірки роботи системи тестами збій може не виникнути; відмови (несправності) виявляються не в момент їх виникнення, а із запізненням, що дорівнює в середньому половині періоду, з яким пропускаються контролювальні тести.

Застосування тільки періодичного тестового контролю зменшує продуктивність системи, оскільки на час проходження тесту система припиняє роботу за основною програмою. Зменшення продуктивності залежить від глибини охоплення тестовим контролем вузлів і елементів системи.

Апаратний (робочий) контроль — це такий контроль, який застосовується безперервно під час усієї роботи системи паралельно із розв'язанням основної задачі та реалізується введенням в її структуру контрольного устаткування. За принципами практичної реалізації апаратного контролю його можна поділити на контроль за модулем, контроль з використанням коригувальних кодів, апаратно-мікропрограмний і мажоритарний контроль.

У зв'язку з тим, що апаратний контроль здійснюється безперервно

впродовж усього часу функціонування об'єкта контролю, можна виявляти як несправності, так і збої в момент їх виникнення або із запізненням на одну-дві операції. Оскільки контрольні операції здійснюються паралельно з основним процесом оброблення й передання інформації, то апаратний контроль майже не зменшує продуктивності системи.

Таким чином, до переваг апаратного контролю можна віднести його безперервність, здатність виявляти як несправності (відмови), так і збої в момент їх виникнення; можливість автоматично локалізувати місце несправності з точністю до функціонального вузла (точніша локалізація здійснюється з допомогою діагностичних тестів); здатність усувати наслідки збоїв безпосередньо під час обчислень автоматичним перемиканням до режиму повторення певної ділянки програми; можливість самоперевірки. Недоліком апаратного контролю є необхідність введення додаткових контрольних засобів, які самі можуть бути джерелом несправностей і збоїв.

Контроль за модулем є найбільш поширеним з усіх методів апаратного контролю і базується на використанні контрольних символів, що є залишками від ділення вихідних чисел на деякий модуль. Під час контролю функціонування великих систем цей метод зазвичай використовують на етапах зберігання, пересилання й перероблення інформації, поданої в дискретному (числовому, цифровому) вигляді. На будь-якому з цих етапів контроль за модулем дає змогу виявити одиночні помилки з імовірністю, що дорівнює одиниці, і багатократні помилки з меншою ймовірністю.

Контроль з використанням коригувальних кодів застосовується у випадках, коли необхідно не лише визначити, але й виправити помилки, що можуть виникнути при переданні інформації. Коригувальні коди утворюються шляхом додавання додаткових контрольних розрядів до інформаційних розрядів коду числа або команди. Коригувальна здатність коду визначається кількістю контрольних розрядів. Суть цього методу контролю полягає у встановленні між інформаційними й контрольними розрядами певних залежностей, за конкретними значеннями яких і відновлюються спотворені інформаційні розряди.

Апаратно-мікропрограмний контроль використовують зазвичай для оперативної перевірки правильності реалізації складних програм оброблення інформації, поданих у дискретному вигляді, коли всю програму заздалегідь можна розбити на декілька незалежних мікропрограм. Цей метод контролю реалізується з допомогою спеціальної апаратури, що забезпечує фіксацію факту виникнення збою. Суть контролю полягає в такому: переривання процесу оброблення інформації і повторення всіх мікрокоманд мікропрограми, під час контролю якої було зафіксовано збій; формування сигналу на продовження оброблення інформації, якщо при повторній реалізації мікропрограми збою не було; виконання діагностичного контролю, якщо кількість повторень

мікропрограми, у якій виник збій, перевищить заздалегідь встановлене значення.

Мажоритарний контроль реалізується на принципах голосування «два з трьох», «три з п'яти» тощо і зводиться до порівняння інформації, що отримується на виходах ідентичних пристроїв, які реалізують одну й ту саму функцію і які ввімкнено паралельно. Пристрій, що видав інформацію, відмінну від вихідної інформації інших пристроїв, блокується. Інформація з його виходу маскується. Цей метод контролю потребує застосування великої кількості додаткового устаткування і застосовується лише у виняткових випадках, коли функціональна відмова системи може призвести до надзвичайно тяжких наслідків (значного матеріально збитку, загибелі людей).

Комбінований контроль може містити як прямі, так і непрямі методи в різних поєднаннях і є більш характерним для СКК КІВ, де головна функція в реалізації процедури прийняття рішення належить оператору.

Кожен з перелічених видів і методів контролю має певні переваги й недоліки, тому в більшості випадків доцільною є їх відповідна комбінація. Така комбінація зазвичай визначається специфікою вирішуваних завдань і принципами будівництва контрольованої системи.

Загальні принципи реалізації програмних і апаратних методів не залежать від того, є об'єкт контролю безперервним чи дискретним. Проте при практичному розробленні методів перевірки функціонування сучасних СКК КІВ необхідно зважати на специфіку кожної з них, звертаючи увагу на особливості взаємодії дискретних і аналогових підсистем (пристроїв, блоків тощо), що належать до таких систем.

4.5. Класифікація процесів контролю і діагностування

Процес контролю — процес розпізнання одного з двох визначених згідно з нормативно-технічною документацією (НТД) класів технічних станів об'єкта, що діагностується [23]. Часто під час контролю розпізнається працездатний $ТС_p$ і непрацездатний $ТС_{\bar{p}}$ стани. *Процес діагностування* — процес розпізнання технічного стану із заданим ступенем деталізації.

Розрізняють також процес *пошуку дефектів*, який являє собою розпізнання однієї із множин $ТС_{\bar{И}}$ завчасно запроваджених класів

несправних станів $ТС_{1\bar{И}}$, $ТС_{2\bar{И}}$, ..., $ТС_{N\bar{И}}$, причому $ТС_{\bar{И}} = \bigcup_{i=1}^N ТС_{i\bar{И}}$, ...,

$ТС_{\bar{p}} \subseteq ТС_{\bar{И}}$.

Загальну класифікацію процесів контролю й діагностування (КД) показано на рис. 4.5. Слід зазначити, що контроль можна розглядати як діагностування з точністю до двох класів.

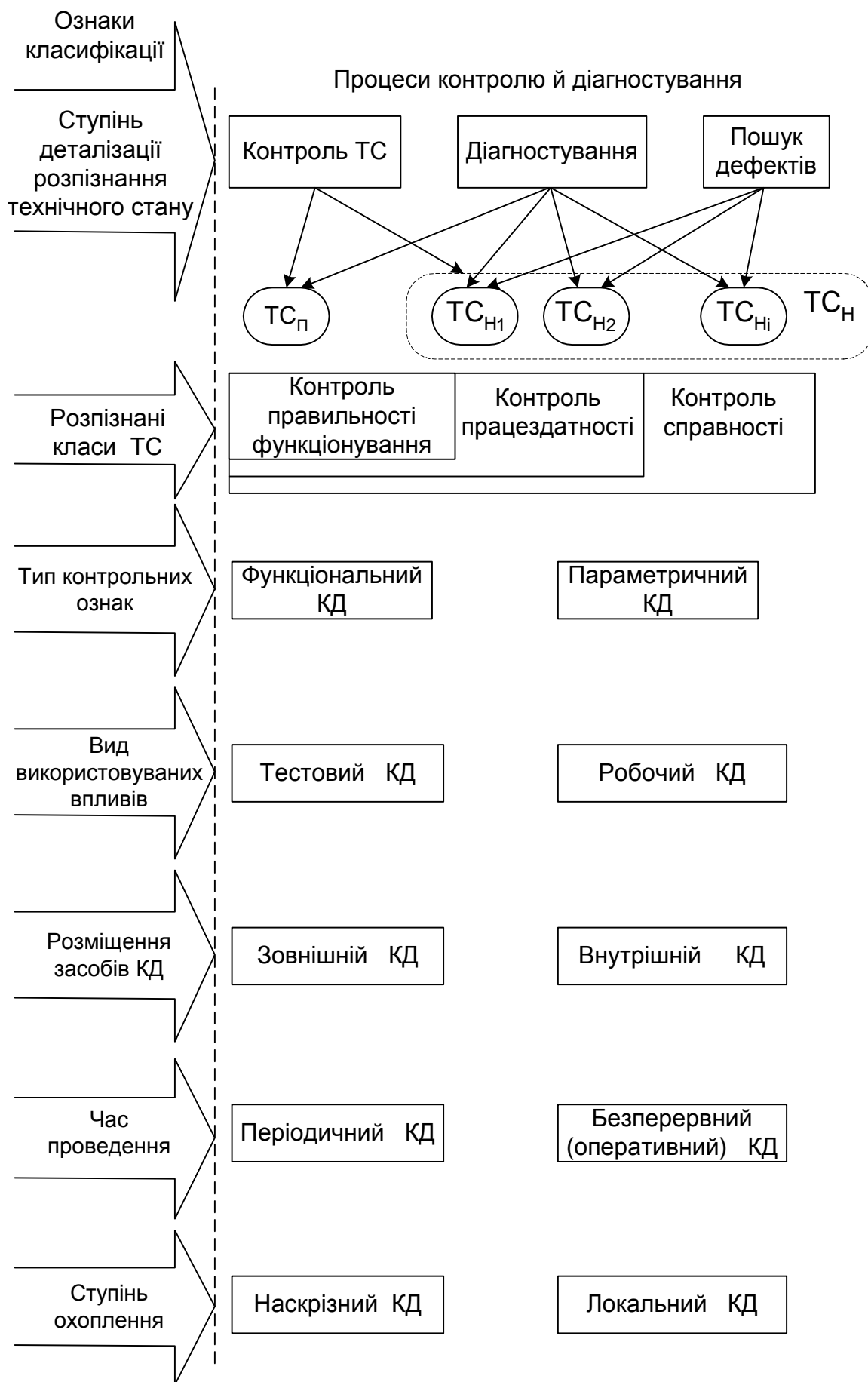


Рис. 4.5. Загальна класифікація процесів контролю й діагностування [10]

Залежно від типів розпізнання класів ТС розрізняють *контроль правильності функціонування, контроль працездатності й контроль справності*. За таким самим порядком під час контролю різних пар класів розпізнаних ТС збільшуються затрати обладнання, часу та ін.

Частковими випадками поняття «контроль» є поняття «відбраковування» і «верифікація». Під *відбраковуванням* розуміється процес розпізнання одного з двох класів ТС, визначених відносно жорстких вимог. Відбраковування здійснюється під час різних випробувань систем. *Верифікація* — це процес розпізнання одного з двох (або декількох) класів ТС, визначених відносно вихідного завдання на проектування.

За типом виявлених ТС процеси контролю й діагностування поділяються на *функціональний* і *параметричний*. У першому випадку як діагностичні ознаки використовуються функції об'єкта, що характеризують його призначення, у другому — параметри об'єкта, які визначаються його властивостями. Важливою ознакою, за якою класифікують процеси КД, є *вид впливів*, що використовуються під час розпізнання технічного стану об'єкта.

Розрізняють дві основні послідовності впливів: *робочу* й *тестову*. *Робоча послідовність* — це вхідна послідовність впливів, яка подається на об'єкт під час його використання за призначенням, тобто в робочому режимі. *Тестова послідовність* — це запроваджена в технічній документації вхідна послідовність впливів, яка подається на об'єкт спеціально з метою його діагностування. Можна розрізнати також дозволені й заборонені робочі й тестові послідовності залежно від допущеності їх подання на об'єкт з огляду на можливість порушення його правильності функціонування (справності). Послідовності вихідних сигналів (реакцій) працездатного об'єкта, які запроваджено в технічній документації, називають очікуваними, або *еталонними*.

Послідовність вихідних реакцій, з допомогою якої характеризується можливий дефект, це очікувана реакція непрацездатного об'єкта. Сукупність тестової й очікуваної послідовностей працездатного об'єкта, які призначено для розпізнання його технічного стану, називають *тестом*. Тест, що реалізує мету того чи іншого процесу розпізнання ТС, має назву відповідно до цього процесу, наприклад тест діагностування, тест контролю, функціональний тест, верифікаційний тест та ін.

Залежно від використовуваних впливів розрізняють *робочий* і *тестовий* КД, які реалізуються відповідно на робочих і тестових впливах. Дуже часто ці два типи КД називають апаратним і програмним, оскільки робочий КД частіше використовується апаратними засобами, а тестовий — програмними. Проте наведений поділ є більш точним, оскільки для використання процесів КД достатньо складних систем КІВ використовується комбінація апаратних і програмних засобів.

Крім того, робочий КД називають також функціональним, виходячи з того, що він використовується під час функціонування об'єкта

(використовується за призначенням).

Залежно від *місця розташування засобів*, з допомогою яких здійснюються контроль і діагностування, розрізняють *зовнішній і внутрішній* КД. Внутрішній контроль і діагностування здійснюють з допомогою засобів, які належать до складу об'єкта. Їх ще називають *вбудованими* засобами КД, а об'єкти, які мають такі засоби, — *самоконтролювальними* або *самодіагностувальними*. Прикладами використання внутрішнього (вбудованого) контролю й самоконтролю є великі інтегральні схеми (ВІС) і надвеликі інтегральні схеми (НВІС). В них на одному кристалі розміщують як цифрову систему, так і засоби її контролю. У деяких випадках засоби КД можна інтегрувати в об'єкт так, що окремі елементи будуть виконувати як функції оброблення інформації, так і функції контролю. У разі застосування зовнішнього КД засоби контролю й діагностування не належать до складу системи, а розташовуються поза нею.

За *часом проведення* процеси КД поділяються на *періодичні й безперервні*. Періодичний КД здійснюється через певні постійні або варійовані за певним законом (правилом) інтервали часу зазвичай з метою перевірки працездатності об'єкта і його готовності до виконання поданих функцій. Періодичний контроль і діагностування можна застосовувати також після виявлення порушення функціонування засобами безперервного (оперативного) КД. Якщо система (КІВ в цілому) перебуває в режимі зберігання або чергування, то безперервним контролем охоплюють найбільш важливі її частини, які визначають готовність до використання. У режимі використання основних задач організується безперервний або періодичний контроль усіх систем КІВ і їх основних частин.

За *ступенем охоплення* об'єкта контролем і діагностуванням вирізняють *наскрізний і локальний* КД. У першому випадку контролюється й діагностується весь об'єкт (усі етапи перероблення інформації), у другому — певна його частина. Процеси КД можна поділити на динамічні й статистичні. Можливі й інші ознаки, за якими можна класифікувати процеси контролю й діагностування [10, 13, 15, 16, 18, 21, 25, 27].

4.6. Засоби й алгоритми контролю і діагностування

Базовими поняттями технічної діагностики як науки є поняття «засоби контролю й діагностування» і «алгоритм контролю й діагностування». Ці поняття тісно пов'язані в реальній практиці проектування й експлуатації підсистем КІВ [9, 11, 20].

Засобами контролю (діагностування) називають технічні засоби, з допомогою яких здійснюється розпізнання технічного стану об'єкта із заданим ступенем деталізації, тобто здійснюється процес контролю (діагностування). На рис. 4.6 зображено класифікацію засобів КД.

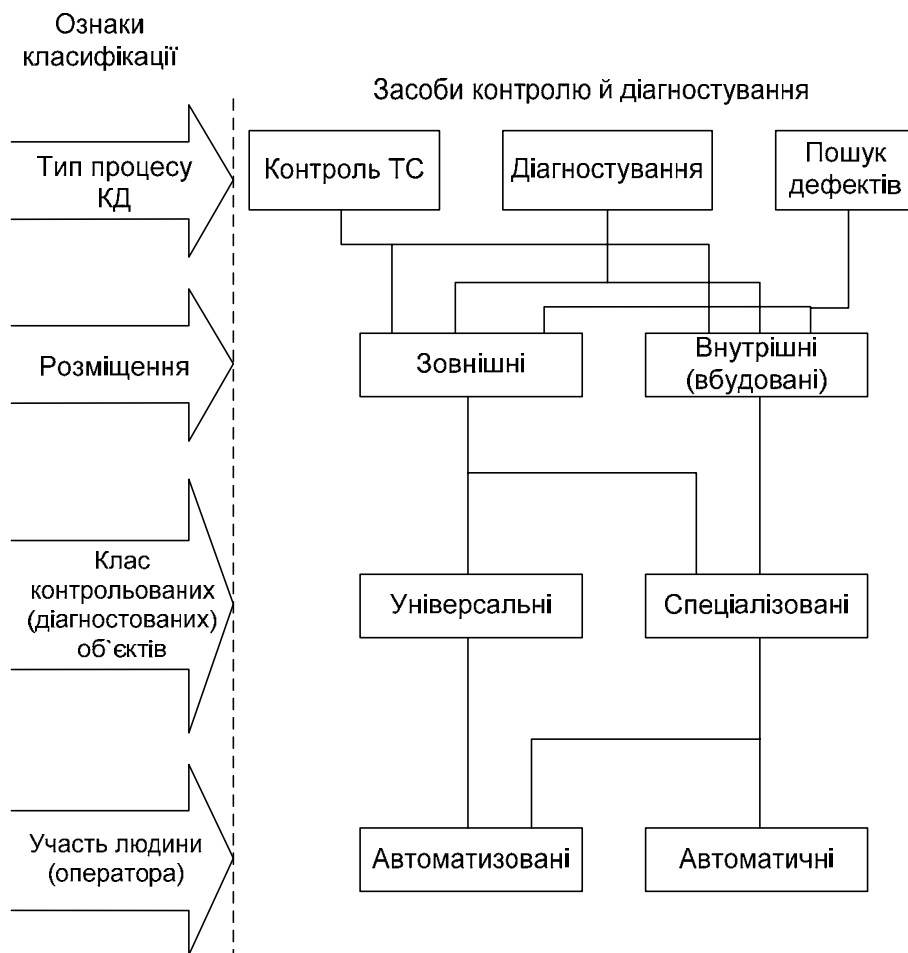


Рис. 4.6. Класифікація засобів контролю й діагностування

Процес контролю й діагностування (рис. 4.7) реалізується засобами КД у певній послідовності. Сукупність розпоряджень, за якою визначається послідовність дій, виконавців і засобів для виконання процесу КД, називають *алгоритмом* контролю (діагностування). Дії, які виконуються під час КД, полягають в поданні вхідних послідовностей або їх фіксації, одержанні послідовностей реакцій (або їх фіксації) та наступному їх аналізі.

Якщо в алгоритмі КД зміст чергової дії D_i на i -му кроці залежить від результатів виконання попередньої дії $D_{(i-1)}$ на $(i - 1)$ -му кроці, то такий алгоритм називають *умовним*. У такому алгоритмі на кожному кроці можливими є декілька продовжень залежно від вихідної реакції і від результатів порівняння її з еталонною реакцією.

Зрештою, рухаючись по одній із гілок алгоритму, можна відразу без додаткового аналізу отримати результат-діагноз, який визначає технічний стан об'єкта. Якщо зміст наступної дії D_i не залежить від результатів виконання попередньої дії $D_{(i-1)}$, то рішення щодо технічного стану об'єкта приймається на основі попереднього аналізу всієї послідовності реакцій на дії D_1, \dots, D_k .

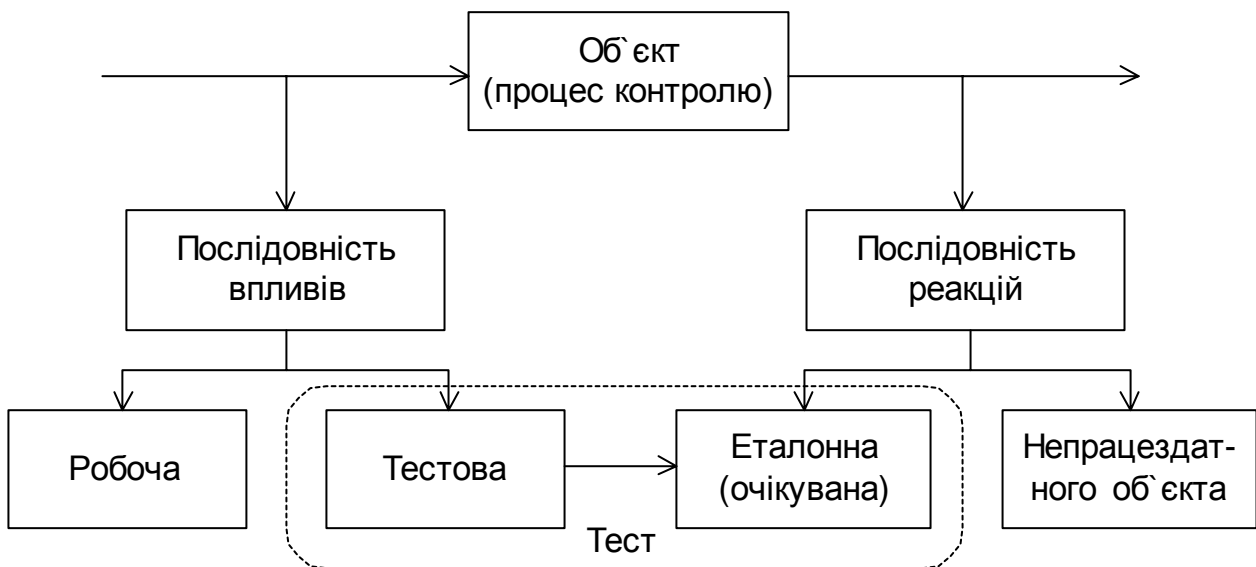


Рис. 4.7. Процес контролю (діагностування) об'єкта

Такий алгоритм КД називають *безумовним*. Безумовні алгоритми КД є більш простими в технічній реалізації, але зазвичай потребують більше часу для розпізнання технічного стану.

Контрольні запитання

1. Обґрунтуйте місце контролю у функціонуванні комп'ютерно-інтегрованих виробництв.
2. Наведіть перелік і визначення технічного стану об'єктів.
3. Наведіть характеристики методів контролю.
4. Дайте означення процесів контролю й діагностування.
5. Назвіть складові процесів контролю й діагностування.
6. Поясніть суть апаратного (робочого) контролю.
7. Поясніть суть тестового (періодичного) контролю.
8. Наведіть порівняльну характеристику прямих методів контролю.
9. Наведіть порівняльну характеристику непрямих методів контролю.
10. Назвіть складові програмно-логічного контролю.

5. МЕТОДИ КОНТРОЛЮ АНАЛОГОВИХ ВУЗЛІВ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ВИРОБНИЦТВ

5.1. Особливості аналогових вузлів як об'єктів контролю

Із безперервних (аналогових) об'єктів контролю КІВ дуже цікавими є пристрої (системи) автоматичного регулювання [16, 26, 30]. Такі системи зазвичай мають бути стійкими й забезпечувати допустиму динамічну сталу похибку. Звичайно, ставляться також ще певні вимоги до характеру проходження перехідного процесу, сукупність яких, як відомо,

називають умовами необхідної якості регулювання. Так, можна ставити вимогу до величини перерегулювання, тривалості регулювання, коливання, максимальної перехідної похибки й т. ін. Отже, функції працездатності мають давати змогу оцінювати стійкість системи, динамічну сталу похибки і якість регулювання за результатами контролю.

Установити прямий зв'язок між параметрами системи й показниками перехідного процесу не завжди вдається. Це можна зробити з допомогою непрямих критеріїв, які зв'язують параметри системи із процесом, що в ній відбувається. Застосовують непрямі критерії оцінювання запасу стійкості, точності й швидкодії систем регулювання, а також комплексні критерії. З допомогою цих критеріїв оцінюють деякі узагальнені властивості, за якими можна урахувати запас стійкості, точність і швидкодію. Необхідно визначити залежність прийнятого критерію від параметрів системи, а також зв'язок між непрямим критерієм і характером перехідного процесу.

5.2. Частотні методи контролю

На практиці широко використовуються як ампліудна частотна $A(\omega)$ (АЧХ) і фазова частотна $\varphi(\omega)$ (ФЧХ) характеристики системи, так і дійсна $R(\omega)$ і уявна $I(\omega)$ складові передавальної функції системи. Частотні методи дають змогу досліджувати не тільки стійкість систем, але й процеси в стійких системах. У разі застосування визначають частотні характеристики $A(\omega)$ і $\varphi(\omega)$, які є придатними для дослідження й оцінювання лінійних і нелінійних (принаймні в межах гармонійної лінеаризації) систем і мають високі інформаційні переваги [16].

У деяких випадках частотні характеристики системи можна визначити через параметри її перехідного процесу. Однак слід враховувати, що в загальному випадку вирішення завдання щодо визначення зв'язку непрямих критеріїв з перехідним процесом пов'язано зі значними труднощами. Вирази для частотних характеристик $A(\omega)$ і $\varphi(\omega)$ досить просто одержати, якщо знати параметри елементів системи. Ці характеристики легко визначити також дослідним шляхом.

Характеристики $R(\omega)$ і $I(\omega)$ аналітично зв'язати з перехідним процесом простіше, ніж характеристики $A(\omega)$ і $\varphi(\omega)$. Тому при визначенні за результатами контролю динамічних параметрів (передатних коефіцієнтів, постійних часу, коефіцієнтів передатних функцій) доцільно використовувати характеристики $R(\omega)$ і $I(\omega)$. З ускладненням передатних функцій значущість цієї рекомендації збільшується. Проте необхідно враховувати, що для вирішення розглянутого завдання рівною мірою можна використати обидві пари характеристик. Це є наслідком того, що характеристики $A(\omega)$, $\varphi(\omega)$ і $R(\omega)$, $I(\omega)$ однозначно зв'язані між собою:

$$A(\omega) = \sqrt{R^2(\omega) + I^2(\omega)};$$

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{I(\omega)}{R(\omega)};$$

$$A(\omega) = |W(j\omega)|;$$

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arg} W(j\omega);$$

$$R(\omega) = \operatorname{Re} W(j\omega);$$

$$I(\omega) = \operatorname{Im} W(j\omega).$$

Відомій структурі системи, що має цілком певні динамічні характеристики, відповідає цілком певна передатна функція $W(j\omega)$. Працездатність і якість перехідного процесу системи визначають за амплітудно-фазовою характеристикою. Такі характеристики можна визначити для номінальних і допустимих значень параметрів.

Умови працездатності системи визначають за допустимим відхиленням амплітудно-фазової характеристики. Контроль системи в цьому випадку зводиться до її експериментального визначення. Для цього частоту ω вхідного гармонійного впливу змінюють від нуля до такого значення, коли на виході системи після згасання перехідного процесу значення $A(\omega)$ виявиться малою величиною.

Якщо умови працездатності сформульовано для динамічних параметрів системи, то функціями працездатності є ці параметри. Необхідні значення динамічних параметрів аналогового вузла КІВ, що контролюється, визначаються на основі аналогічно описаних вимірювань і розв'язань у загальному випадку нелінійних рівнянь:

$$A(\omega_i) = |W(j\omega_i)|;$$

$$\varphi(\omega_i) = \operatorname{arg} W(j\omega_i);$$

$$R(\omega_i) = \operatorname{Re} W(j\omega_i);$$

$$I(\omega_i) = \operatorname{Im} W(j\omega_i), i = \overline{1, n}.$$

Отримані значення параметрів порівнюються з відповідними допустимими обмеженнями на кожний із них:

$$\Delta_s = q_s^0 - q_s \leq \Delta_{sd}, \quad (5.1)$$

де q_s^0 , q_s — номінальне й фактичне значення параметра s ;

Δ_s , Δ_{sd} — фактичне й допустиме відхилення значення параметра s від номінального значення.

При цьому можуть ураховуватися величини відхилень, або знак, або їхнє абсолютне значення.

Якщо відомою є залежність між параметрами і критерієм ефективності

системи, оцінювати працездатність доцільно на основі виконання умов

$$K(q_s) \geq K_d, \quad (5.2)$$

$$\Delta K(q_s) \leq \Delta K_d, \quad s = \overline{1, m}, \quad (5.3)$$

де K_d й ΔK_d — відповідно допустиме значення критерію ефективності системи й допустиме його відхилення від номіналу.

У загальному випадку залежності $K(q_s)$ і $\Delta K(q)$ мають складний вигляд. В окремих випадках допустимим є використання спрощених співвідношень, наприклад

$$\Delta K(q_s) = \sum_{s=1}^m \left(\frac{\partial K(q_s)}{\partial q_s} \right)_0 \Delta q_s. \quad (5.4)$$

Цей метод оцінювання застосовують у випадку, коли є можливість за результатами контролю безпосередньо визначати параметри, від яких залежить критерій ефективності аналогового вузла КІВ.

5.3. Часові методи контролю

При часовому контролі стан безперервної системи оцінюють на основі аналізу її перехідного процесу при деякому типовому входному впливі, тобто для контролю використовується перехідний режим системи, що контролюється. Зазвичай таким впливом є одиничний стрибок. У цьому випадку крива перехідного процесу для регульованої величини $z(t)$ являє собою перехідну характеристику системи (рис. 5.1).

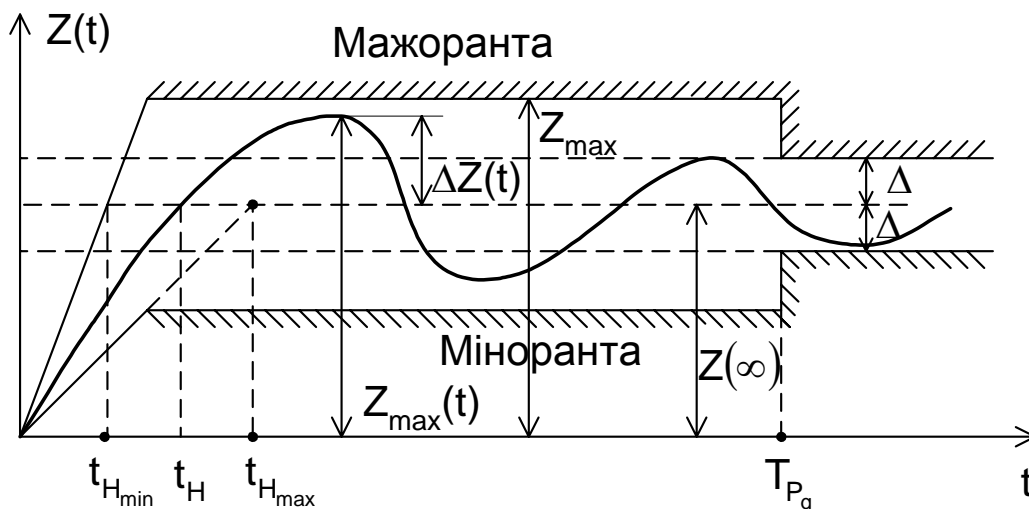


Рис. 5.1. Перехідна функція об'єкта контролю [16]

Оцінювати можна також характер закону змінення помилки:

$$\Delta z(t) = z(t) - z(\infty), \quad (5.5)$$

де $z(\infty)$ — стає значення регульованої величини після завершення перехідного процесу.

Висновок щодо якості перехідного процесу можна зробити за результатом порівняння отриманої характеристики з областю, яку обмежено маторантою і мінорантою. Запас стійкості можна охарактеризувати максимальним значенням регульованої величини z_{max} або перерегулюванням:

$$\delta\% = \frac{z_{max} - z(\infty)}{z(\infty)} \cdot 100\%, \quad (5.6)$$

причому має виконуватись умова

$$\delta\% < \delta_d\%.$$

Допустиме значення δ_d визначається необхідними якостями системи. У більшості випадків вважається, що запас стійкості є достатнім, якщо величина перерегулювання не перевищує 10–30%. У деяких випадках необхідно, щоб перехідний процес проходив взагалі без перерегулювання, тобто був монотонним, інколи допускається перерегулювання до 50–70%.

Додатково до показників $\delta\%$ або z_{max} для оцінювання системи можна задати допустиму кількість коливань, що спостерігаються протягом перехідного процесу. Зазвичай допускають 1–2, а іноді й 3–4 коливання. Можливі випадки, коли коливання зовсім не допускаються.

Швидкодію системи можна оцінювати за тривалістю перехідного процесу T_p , що визначається як час, який проходить від моменту подання на її вхід одиничного стрибка, до моменту, після якого має місце нерівність

$$|z(t) - z(\infty)| \leq \Delta, \quad (5.7)$$

де Δ — задана постійна величина, що зазвичай являє собою допустиму помилку.

Максимальна тривалість перехідного процесу T_{pd} визначається особливостями застосування системи. Точність системи регулювання оцінюється величиною помилки в момент часу $t = T_p$, причому має виконуватись умова

$$|z(t - T_p) - z(\infty)| \leq \Delta. \quad (5.8)$$

Швидкодія системи може характеризуватися також крутістю характеристики, що оцінюється часом досягнення значення вихідного сигналу $z(t)$ певного рівня (за такий рівень зазвичай приймають значення 0,5...1): $\frac{z(t)}{z(\infty)} = 0.5...1$.

Необхідна якість системи буде забезпечена, якщо

$$t_{H_{\min}} \leq t \leq t_{H_{\max}}.$$

Максимальний час наростання $t_{H_{\max}}$ визначається необхідною швидкодією, а мінімальний $t_{H_{\min}}$ — допустимими в системі прискореннями й коливальними режимами.

Очевидною є простота технічної реалізації часових методів контролю. Перевагою цих методів є те, що з їх допомогою можна оцінити стан системи, яка контролюється, у динамічному (перехідному) режимі. Це обумовлює також малий час перевірки. Генератори стимулювальних впливів є порівняно простими. Однак через сильний вплив перешкод точність вимірювання характеристик перехідного процесу є низькою. Майже неможливо установити аналітичні співвідношення між показниками перехідного процесу й параметрами системи, що перевіряється. Діагностичні можливості цих методів є досить слабкими.

Розглянуті часткові характеристики показників якості перехідного процесу можна використати для будування комплексного критерію оцінювання працездатності системи з урахуванням ваг відповідних показників. З цією ж метою можна розглядати інтегральні властивості перехідного процесу.

5.4. Інтегральні методи контролю

Інтегральний метод оцінювання працездатності у загальному випадку можна подати у вигляді [16]

$$S = \int_0^{T_p} F dt \leq S_1, \quad (5.9)$$

де F — деяка функція від змінних, що характеризують стан системи, наприклад від динамічної складової похибки регульованої величини $\Delta z_d(t)$ та її похідних.

Вид функції слід вибрати так, щоб функціонал S мав необхідну чутливість до змін відповідних параметрів системи. Припустимо, у системі забороняється тривале існування значних відхилень $\Delta z_d(t)$ і великі значення похідних $\frac{dz_d(t)}{dt}$. Ці вимоги задовольняє вираз

$$F = z_d^2(t) + T^2 \left(\frac{dz_d(t)}{dt} \right)^2, \quad (5.10)$$

де $T = \text{const}$.

Для F можна використати більш складну квадратичну форму, у деяких випадках застосовують прості вирази, наприклад:

$$F = z_d^2(t); \quad F = tz_d(t); \quad F = t^2 z_d^2(t).$$

Перевага інтегральних методів контролю визначається тим, що вони дають змогу узагальнено (інтегрально) оцінити стан системи, є простими для виконання, а для їх реалізації потрібно небагато часу, який незначно перевищує час перехідного процесу. Для контролю використовується перехідний режим роботи системи. Однак слід урахувати, що за величиною інтеграла S у загальному випадку не можна зробити висновки щодо характеру перехідного процесу.

Яким би малим не було значення інтеграла, не можна стверджувати, що в будь-який момент значення $z_d(t)$ є досить малим. У деяких випадках не можна навіть стверджувати, що процес, для якого значення інтеграла буде незначним, є кращим.

За значенням величини S не можна оцінити деякі істотні особливості перехідного процесу. Наприклад, після проведення контролю неможливо визначити, чи був необхідним викид значення перехідного процесу внаслідок правильної роботи коригувального контуру. Діагностичні можливості інтегральних методів є досить обмеженими.

Основою розглянутих тестових методів контролю безперервних пристроїв і систем є як прямі, так і непрямі критерії якості. Через обмежені діагностичні можливості ці методи зазвичай застосовуються тільки для контролю працездатності.

У деяких випадках застосовуються діагностичні методи контролю з використанням спеціального виду вхідних впливів. Будівання діагностичних тестів є досить складним завданням. Їх практична реалізація також є складною, тому що при цьому потрібне трудомістке оброблення вихідної реакції на такий тест.

Розглянуті тут методи контролю, що дають змогу охарактеризувати стійкість і певні якісні показники перехідного процесу, можна застосовувати в загальному випадку до систем керування як безперервної, так і дискретної дії.

Контрольні запитання

1. Наведіть особливості аналогових вузлів як об'єктів контролю.
2. Обґрунтуйте переваги й недоліки частотних методів контролю.
3. Обґрунтуйте переваги й недоліки часових методів контролю.
4. Обґрунтуйте умови доцільного використання інтегрального методу контролю.
5. Наведіть означення амплітудної частотної $A(\omega)$ (АЧХ) і фазової частотної $\varphi(\omega)$ (ФЧХ) характеристик системи.
6. Наведіть порядок визначення дійсної $R(\omega)$ та уявної $I(\omega)$ складових передавальної функції системи.
7. Обґрунтуйте доцільність дослідження частотних і часових характеристик аналогових вузлів.
8. Назвіть переваги й недоліки інтегральних методів контролю.
9. Наведіть вираз для змінення помилки регулювання.
10. Яким чином визначається запас стійкості неперервних систем?

6. МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ЦИФРОВИХ ВУЗЛІВ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ВИРОБНИЦТВ

6.1. Загальні відомості

Цифрові вузли СКК КІВ можуть бути оптичними, електромагнітними (контактними), електронними (безконтактними) та ін. Зараз найбільшого поширення набули електронні напівпровідникові елементи в інтегральному виконанні – цифрові інтегральні схеми (ІС). Вони являють собою набір базових елементів – вентилів, з'єднаних провідниками на напівпровідниковому кристалі, який розміщено в одному із стандартних корпусів.

У сучасних системах контролю й керування КІВ також широко застосовуються контактні елементи. Для замикання й розмикання електричних ланцюгів в них застосовуються електромеханічні впливи. Формують ці впливи з допомогою кнопок і контактів з механічним керуванням. Найбільш універсальним контактним елементом є електромагнітне реле. Характерною особливістю контактних елементів є їхня двостороння провідність.

Реле не можна порівняти за універсальністю і легкістю роботи з ними при будівництві цифрових пристроїв, незважаючи на те, що інші логічні елементи зараз є кращими за швидкістю, габаритами й вартістю.

Двостороння провідність контактів і можливість будувати електричні ланцюги з опором, близьким до нуля або до нескінченності, а також контактами перемикають значний струм роблять в багатьох випадках доцільним використання тільки реле.

Під час аналізу умов функціонування цифрових пристроїв вихідні відомості про них задаються у вигляді функціональної або принципової електричної схеми. Результати аналізу наводяться словами, у вигляді таблиць відповідності, логічних формул або в цифровій формі.

Реальні пристрої є різними за складністю і принципами будовання, їхні схеми реалізуються на різних фізичних елементах (інтегральні схеми, феритові елементи, релейно-контактні елементи тощо [1–3, 9, 12–16]). Усе це враховується при розв'язанні задачі аналізу. Однак при її розв'язанні можна зазначити деякі загальні етапи, що застосовуються при аналізованні комбінаційних пристроїв будь-якої складності, реалізованих на будь-яких логічних елементах.

1. За функціональною або принциповою електричною схемою визначаються входи, виходи пристрою і типи логічних елементів, на яких його реалізовано. Входи, виходи й елементи на схемі позначають зазвичай буквено-цифровими символами. Для спрощення подальшого аналізу входи й виходи перепозначаються логічними змінними, наприклад, входи – через X_1, X_2, \dots, X_n , а виходи – через Z_1, Z_2, \dots, Z_m .

2. Установлюються кількість і характер зв'язків між елементами, визначається можливість поділу схеми на функціонально відокремлені за входами й виходами частини. Для кожного із застосованих логічних елементів визначається логічна функція, яку він реалізує, і вилучаються з процесу аналізуванні всі допоміжні елементи (формувачі, повторювачі, підсилювачі та ін.).

3. З урахуванням пп. 1 і 2 будується спрощена функціональна схема пристрою і у разі потреби її перетворюють до вигляду, що буде зручним для подальшого аналізу.

4. За отриманою схемою визначаються умови функціонування пристрою у вигляді словесного опису, таблиць відповідності, логічних формул, або в цифровій формі.

Для пристроїв, побудованих на безконтактних схемах (наприклад, на інтегральних мікросхемах), зручніше спочатку отримати логічні формули. При цьому рекомендується аналіз проводити від виходів до входів в такій послідовності:

а) позначити виходи всіх внутрішніх логічних елементів, при цьому до внутрішніх належать всі елементи, крім вихідних, зі значеннями вихідних сигналів Z_1, Z_2, \dots, Z_m ;

б) визначити логічні формули, які описують значення сигналів на виходах внутрішніх елементів з урахуванням позначень, що було введено раніше;

в) логічні формули, які пов'язують вхідні й вихідні сигнали пристрою,

визначаються шляхом послідовного підставлення формул, одержаних у попередньому пункті, аж до повного вилучення проміжних змінних.

6.2. Моделі відмов дискретних елементів

Моделі відмов релейно-контактних схем. При аналізі технічного стану цифрових систем, побудованих з використанням релейно-контактних схем, найбільш імовірними є відмови окремих контактів реле: обрив контакту x ($x \equiv 0$) і залипання контакту x ($x \equiv 1$) [16]. На рис. 6.1 графічно зображено ці типи відмов.

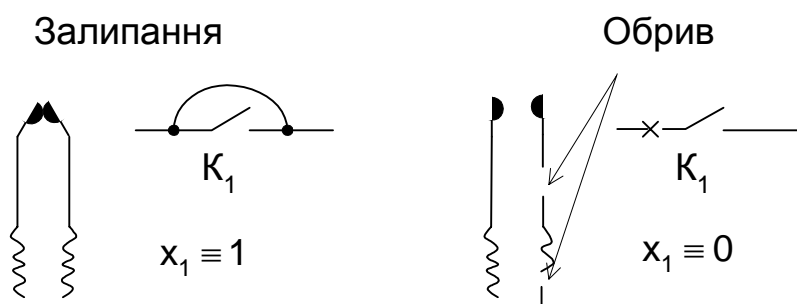


Рис. 6.1. Контакти реле з відмовами

Приклад комбінаційного пристрою з відмовами, побудованого з використанням релейно-контактних схем, показано на рис. 6.2.

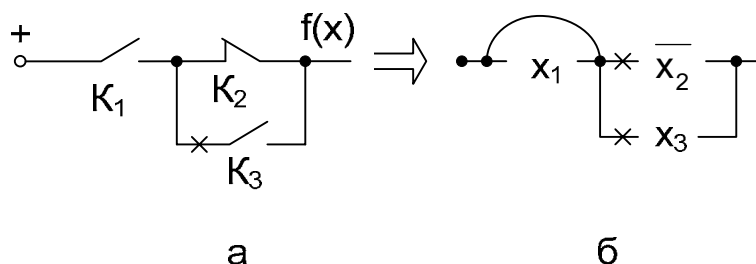


Рис. 6.2. Приклад комбінаційного пристрою на РКС з відмовами

У справному стані контакти реле k_1 і k_3 (або контакти x_1 і x_3) є нормально розімкненими, а контакт реле k_2 (x_2) — нормально замкненим.

Можливими станами такого пристрою є:

d_0 — відсутність дефектів;

d_1 — залипання контакту x_1 ;

d_2 — обрив контакту x_2 ;

d_3 — обрив контакту x_3 .

Логічні функції, які реалізує комбінаційний пристрій за відсутності

дефектів $f(d_0)$ і за наявності дефектів d_1-d_3 , $f(d_1)-f(d_3)$ мають такий вигляд:

$$f(d_0) = x_1 (\overline{x_2} \vee x_3) ;$$

$$f(d_1) = \overline{x_2} \vee x_3 ;$$

$$f(d_2) = x_1 x_3 ;$$

$$f(d_3) = x_1 x_3 .$$

Розглянемо схему іншого комбінаційного пристрою (рис. 6.3), який реалізує більш складну логічну функцію.

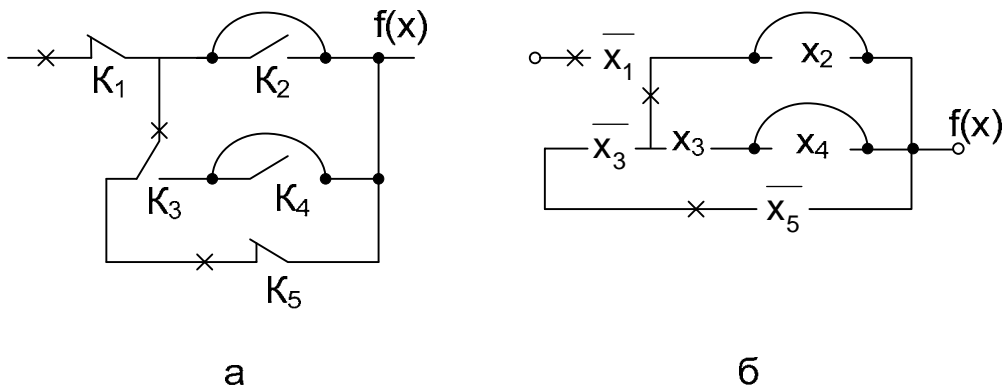


Рис. 6.3. Приклад комбінаційного пристрою на РКС з відмовами

Можливими станами такого пристрою є:

d_0 — відсутність дефектів;

d_1 — обрив контакту x_1 ;

d_2 — залипання контакту x_2 ;

d_3 — обрив контакту x_3 ;

d_4 — залипання контакту x_4 ;

d_5 — обрив контакту x_5 .

Розглянемо логічні функції, які реалізує комбінаційний пристрій за відсутності дефектів $f(d_0)$ і за наявності дефектів d_1-d_5 , $f(d_1)-f(d_5)$:

$$f(d_0) = \overline{x_1} (x_2 \vee \overline{x_3 x_5} \vee x_5 x_4) ;$$

$$f(d_1) = 0; f(d_2) = \overline{x_1}; f(d_3) = \overline{x_1} x_2; f(d_4) = \overline{x_1} (x_2 \vee \overline{x_3 x_5} \vee x_4) ;$$

$$f(d_5) = x_1 (x_2 \vee x_3 x_4) .$$

Моделі відмов безконтактних логічних елементів. Для контролю й діагностування вузлів КІВ, побудованих з використанням безконтактних

логічних елементів (І, АБО, НІ, І-НІ, АБО-НІ тощо), застосовують такі моделі відмов виводів безконтактних логічних елементів: обрив виводу ($x \equiv 1$), замикання виводу ($x \equiv 0$) [16]. На рис. 6.4 показано можливі відмови логічного елемента І і табличне задання логічних функцій, які він реалізує у справному стані й у станах відмов виводів.

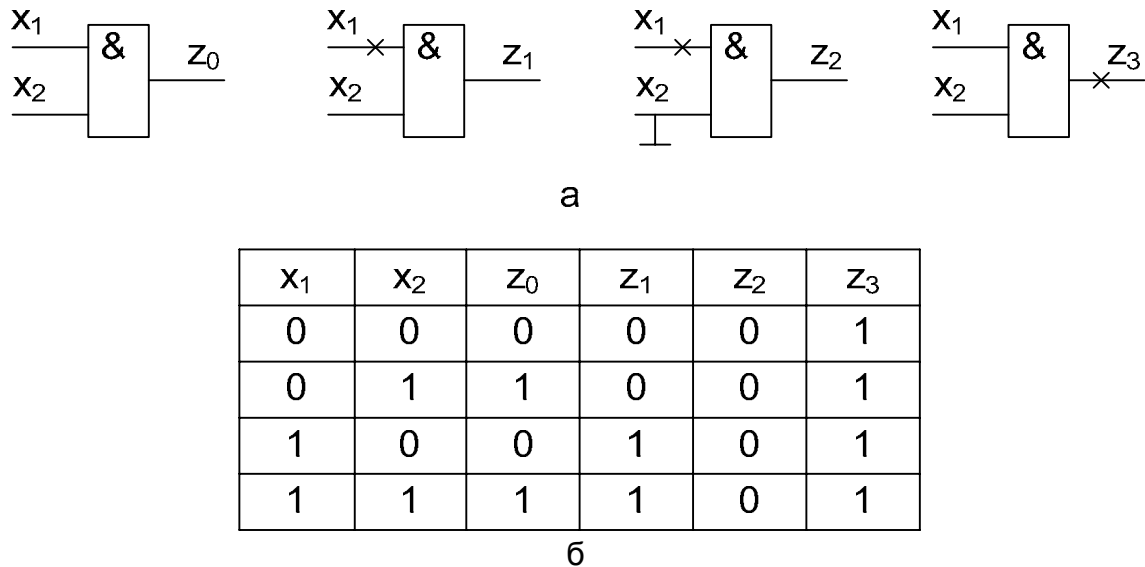


Рис. 6.4. Моделі відмов безконтактних логічних елементів

6.3. Методи апаратного контролю

Для реалізації апаратного контролю до складу вузла або пристрою вводиться надмірне (контрольне) обладнання, яке функціонує одночасно з основним обладнанням (апаратурою). Сигнали, що виникають під час функціонування основної і контрольної апаратури, за певними законами зіставляються між собою. Унаслідок цього зіставлення можна одержувати інформацію щодо правильності функціонування контрольованого вузла (пристрою).

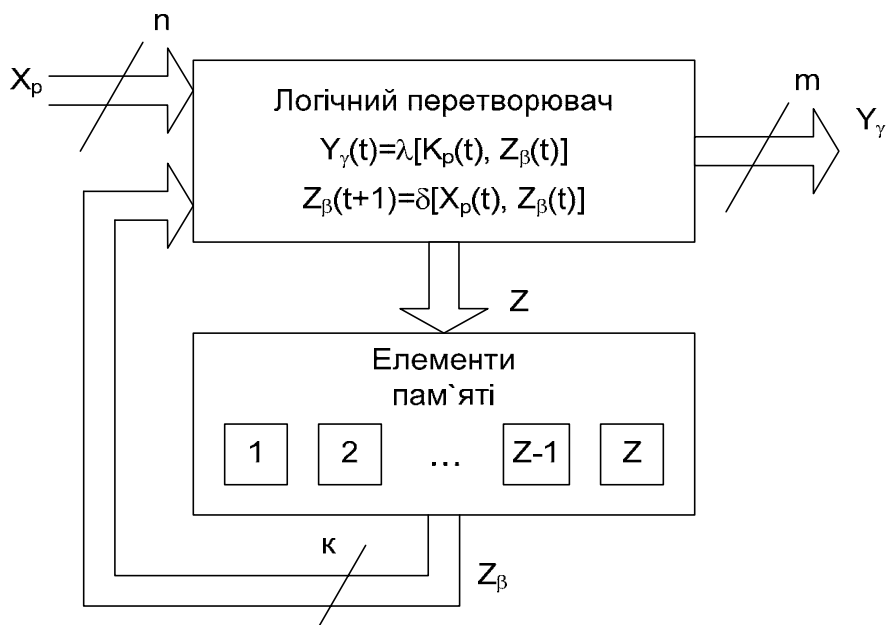
У загальному випадку функціональний вузол **A** пристрою можна подати у вигляді кінцевого автомата, що містить однотактний логічний перетворювач (ЛП) з f входами, ω виходами і z зворотними зв'язками, у кожному з яких розміщено двопозиційний елемент пам'яті (ЕП) (рис. 6.5, а), контрольний пристрій можна також подати у вигляді деякого кінцевого автомата **B**.

У загальному вигляді модель функціонального вузла (пристрою) із системою апаратного контролю зображено на рис. 6.5, б. Тут **A** і **B** — основний і контрольний автомати; **C** — вузол зіставлення.

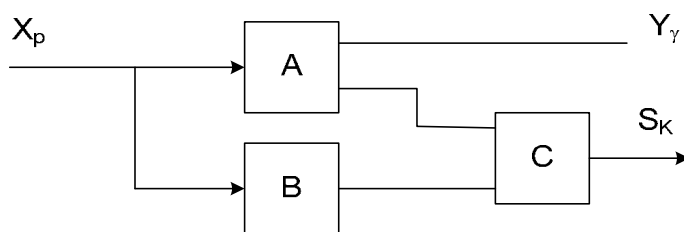
Виходячи зі способів подання кінцевих автоматів, можна подати такі методи зіставлення процесів функціонування основного **A** й контрольного **B** автоматів:

- зіставлення внутрішніх станів автоматів **A** і **B**;
- зіставлення виходів автоматів **A** і **B**;
- зіставлення переходів автоматів **A** і **B** з одного стану в інший.

Вибравши за ознаку контрольні співвідношення, покладені в основу побудови автомата **B** і вузла зіставлення **C**, можна подати класифікацію методів апаратного контролю (рис. 6.6) [13].



а



б

Рис. 6.5. Структурна схема кінцевого автомата (а) і узагальнена схема його контролю (б)

Дублювання є найпростішим способом контролю для усіх трьох методів зіставлення. У цьому випадку автомат **B** є ідентичним автомату **A**. Найбільш поширені на практиці методи ґрунтуються на зіставленні вихідних сигналів. Передусім це числовий контроль за модулем, який широко використовується для контролю засобів перероблення цифрової інформації. У цьому випадку автомат **A** є пристроєм, що виконує арифметичні операції (складання, віднімання, множення й ділення). Автомат **B** виконує операції над контрольними словами, які є найменшими залишками від ділення цих чисел на деякий модуль контролю, — обчислення.



Рис. 6.6. Методи контролю пристроїв

Результати виконання операцій порівнюються за модулем. Уважається, що операцію виконано правильно, якщо має місце тотожність результатів.

Структурну схему вузла (пристрою), контрольованого за модулем, показано на рис. 6.7, де F — пристрій для знаходження залишку від X_p за модулем; D — пристрій порівняння результатів за модулем.

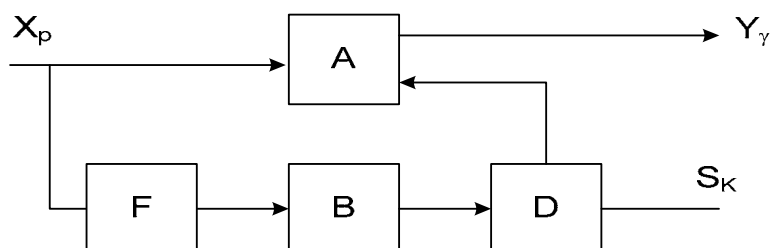


Рис. 6.7. Структурна схема вузла (пристрою), що контролюється за модулем

Подальшим розвитком числового контролю за модулем є контроль з використанням арифметичних коригувальних кодів. При застосуванні цього способу контролю використовується декілька контрольних автоматів, які виконують операції з обчисленнями за різними модулями.

На основі аналізу вихідних слів контрольних автоматів знаходять і виправляють помилку у вихідному слові автомата **A**. Виправлення здійснює коригувальний пристрій, на вхід якого подаються результати порівняння вихідних слів основного й контрольних автоматів за вибраними модулями. На рис. 6.8 зображено структурну схему арифметичного автомата з контролем за трьома різними модулями.

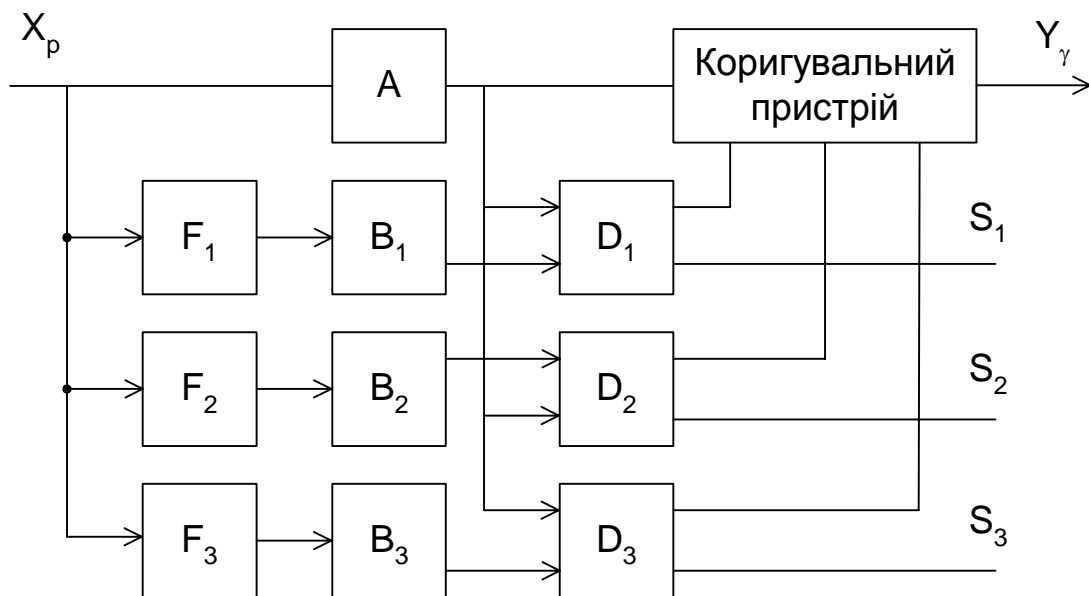


Рис. 6.8. Функціональна схема вузла з контролем за трьома модулями

Контроль пристроїв, що працюють зі словами, наведеними в системах числення залишкових класів, сприяє розвитку й поглибленню ідей, покладених в основу апаратного контролю за модулем.

Загальні принципи будовання засобів контролю залишаються тими самими, що й при контролі за модулем. Проте специфіка подання чисел в системі числення залишкових класів приводить до деяких особливостей методів виявлення й виправлення помилок, а також будовання контролювальних пристроїв.

На практиці також отримав поширення кодовий контроль за модулем. Він відрізняється від числового тим, що як контрольні слова використовуються залишки від ділення суми цифр цього слова на вибраний модуль контролю. Найбільш поширеним варіантом цього виду контролю є контроль за парністю (непарністю).

Для контролю передання й зберігання інформації застосовуються коригувальні коди (коди Хемінга, циклічні коди тощо). Автомат **A** в цьому

випадку інформацію не переробляє.

Структурну схему вузла, який контролюється з допомогою коригувальних кодів, зображено на рис. 6.9.

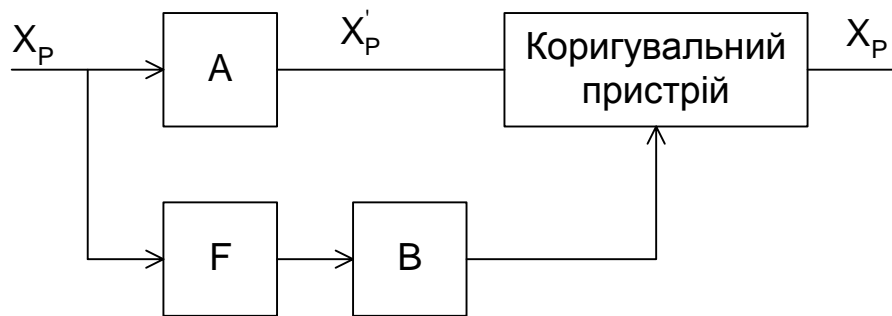


Рис.6.9. Функціональна схема вузла з кодовим контролем за модулем

Процес контролю зводиться тут до формування спеціальних контрольних слів на вході автомата **B** і до перевірки відповідності вихідних слів автоматів **A** і **B**.

Контрольні співвідношення, що виникають за результатами застосування коригувальних кодів, дають змогу не лише виявляти спотворення інформації, але й виправляти помилки, що виникли. Для цієї мети використовується коригувальний пристрій.

Розповсюдженим методом контролю є використання уведеної у вузли й пристрої апаратної надмірності. Існування такої надмірності призводить до виникнення значної кількості станів, які при нормальній роботі не використовуються (є забороненими).

Структура пристрою (рис. 6.10) вибирається таким чином, щоб у разі виникнення помилок з більшою ймовірністю відбувався перехід в заборонені стани.

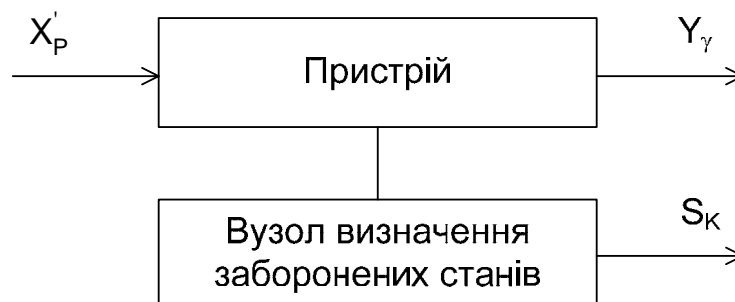


Рис. 6.10. Функціональна схема вузла з контролем потрапляння в заборонені стани

Для визначення факту потрапляння пристрою в один із заборонених станів має бути передбачено окремий вузол Аналогічно проводиться перевірка за забороненими вихідними словами і забороненими переходами.

6.4. Методи програмного контролю

Необхідність програмного контролю викликана недоліками апаратних методів контролю: недостатньою повнотою охоплення й глибиною контролю всіх пристроїв; значними витратами устаткування для забезпечення високої ефективності апаратного контролю. Крім того, для багатьох блоків і пристроїв КІВ важко здійснити апаратний контроль. Програмний контроль поділяють на програмно-логічний, алгоритмічний і тестовий [10, 16, 19, 23].

Програмно-логічний контроль ґрунтується на використанні надмірності вихідної, проміжної й результуючої інформації обчислень. Наявність надмірності дає змогу в деяких випадках знаходити певні контрольні співвідношення, з допомогою яких можна виявити помилки обчислень. Наприклад, при обчисленні тригонометричних функцій можна використати контрольний вираз $\sin^2 x + \cos^2 x = 1$.

Для перевірки правильності обчислення складових r_x , r_y і r_z вектора r можна використати залежність $|r| = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2}$. Одним із способів програмно-логічного контролю є контроль несуперечності результатів. Іншими способами програмно-логічного контролю є стробування, перевірка на виникнення недозволених кодів (кодових комбінацій), аналіз швидкості змінення аргументів функції тощо.

Алгоритмічний контроль є таким способом, що дає змогу завдяки деякому ускладненню алгоритму того або іншого завдання перевірити правильність його виконання пристроєм. Зазвичай використовують два основні способи алгоритмічного контролю:

- використання спрощеного алгоритму вирішення завдання паралельно з основним алгоритмом;
- уведення в завдання додаткових змінних, що забезпечують одержання необхідної надлишкової інформації.

Програмно-логічний і алгоритмічний контроль є ефективними тільки у разі відсутності помилок у вихідній інформації. Тому її контроль є однією з важливих функцій системи програмного контролю.

Вихідна інформація може бути як змінною (змінюватися при обчисленнях), так і постійною (константною). Для контролю змінної інформації можна використовувати всі описані вище способи. Найпоширенішим способом контролю правильності значень констант є їх контрольне підсумовування.

Усі способи програмного контролю обчислень є ефективними тільки за умови правильності ходу програми. Існують такі способи контролю:

- виконання й послідовності ввімкнення програм;
- тривалості роботи ділянок програми;
- виконання переходів і переривань та ін.

Однак при реалізації програмного контролю необхідно мати додаткові

ресурси пам'яті й продуктивності засобів оброблення інформації.

Майже всі види програмного контролю дають значно більше запізнення у виявленні помилок порівняно з методами апаратного контролю. Тому програмний контроль доцільніше використовувати для виявлення тих помилок, які недостатньо ефективно виявляють засоби апаратного контролю. Такий підхід дає змогу одержати розвинену систему апаратно-програмного контролю засобів оброблення інформації в КІВ.

Тестовий контроль базується на використанні іспитових програм — тестів, що вирішують певні завдання із заздалегідь відомою відповіддю. Розрізняють два види тестів: перевірні й діагностичні.

Перевірні тести призначено для перевірки справності апаратних засобів цифрових систем КІВ. Їх використовують зазвичай в інтервалі часу між виконанням ділянок основної програми або після виконання технічного обслуговування чи ремонту. Діагностичні тести використовуються для локалізації місця відмови.

Розглянемо суть тестового контролю й діагностування. Припустимо, що пристрій КІВ працює правильно, якщо всі його складові й елементи перебувають у справному стані. У цьому випадку пристрій реалізує необхідну функцію $f(t)$.

У разі виникненні відмови пристрій буде реалізовувати функцію, що відрізняється від $f(t)$. Для перевірки працездатності пристрою, який реалізує n -розрядну булеву функцію, необхідно на його вхід подати 2^n різних значень вхідних змінних і зіставити одержані значення зі значенням вихідної функції.

Розбіжність цих значень хоча б на одному наборі вхідних змінних буде свідчити про наявність у вузлі відмови. У цьому полягає суть тестового контролю. Якщо заздалегідь буде встановлено однозначну відповідність між відмовою й вихідною функцією, що породжена цією відмовою, то виявлена під час контролю вихідна функція однозначно визначатиме характер і місце відмови.

Послідовність 2^n наборів значень змінних, що забезпечує перевірку справності пристрою і реакцій на них, є перевірним тестом. За наявності відповідності між відмовою й функцією, що породжується нею, цей тест буде також і діагностичним.

Кількість наборів тесту називають довжиною тесту. Тест, що містить 2^n складових, має максимальну довжину, і його називають тривіальним. У більшості випадків він є надлишковим і при великому n майже нереалізовним. Тест, що містить найменшу кількість наборів значень змінних, називають мінімальним.

На практиці використовуються мінімальні тести. Пошук мінімального тесту здійснюється на основі аналізу можливих відмов і виявлення функцій, реалізованих на виході вузла за наявності тієї або іншої відмови. Ці функції будемо називати функціями несправностей.

Отже, щоб одержати функції несправностей, необхідно ввести у вузол

можливі (характерні) відмови й виявити, до яких наслідків на виході призведе кожна можлива відмова. Для забезпечення цього завдання всі відмови зводять до закріплення на входах і виходах елементів логічних констант «0» й «1» і за цих умов будують функції несправностей у вигляді таблиць або булевих виразів.

У загальному випадку кількість різних функцій несправностей є меншою за кількість уведених для розгляду відмов, оскільки різні відмови можуть давати на виході однакову функцію. Якщо різні відмови призводять до реалізації на виході однакової функції, то ці відмови не різняться між собою і всі разом становлять одну відмову.

Функції несправностей дають змогу одержати перевіряльні тести мінімальної довжини. Разом з тим, оскільки кожна функція відповідає певній відмові, перевіряльний тест може визначити й місце відмови. Таким чином, тест має і діагностичні властивості.

Однак для того, щоб перевіряльний тест мав діагностичні властивості, необхідно, щоб було попарне розрізнення всіх функцій несправностей на множині вхідних наборів, які утворюють тест. У цілому процедури будівництва тестів для вузлів і пристроїв КІВ є досить складними й потребують значних матеріальних витрат.

Тому в практиці контролю складних систем використовується методика, що містить такі послідовні етапи:

- аналіз структури системи та її декомпозицію на блоки, що підлягають контролю;
- складання й мінімізація тесту для кожного блоку, що контролюється.

Контрольні запитання

1. Побудуйте моделі відмов безконтактних логічних елементів, що реалізують функції І, АБО, НІ.
2. Побудуйте моделі відмов релейно-контактних схем.
3. Наведіть порівняльну характеристику методів апаратного контролю.
4. Наведіть порівняльну характеристику методів програмного контролю.
5. Обґрунтуйте алгоритм взаємодії апаратних і програмних засобів контролю.
6. Наведіть структурну схему кінцевого автомата.
7. Наведіть узагальнену схему контролю кінцевого автомата.
8. Наведіть структурну схему пристрою, що контролюється за модулем.
9. Обґрунтуйте алгоритм взаємодії апаратних і програмних засобів контролю.
10. Дайте означення тривіального тесту.

7. СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ І ДІАГНОСТУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ВИРОБНИЦТВ

Завдання контролю й технічної діагностики складних об'єктів, до яких належать КІВ, на практиці вирішуються шляхом створення й використання систем контролю й діагностування (СКД), які являють собою сукупність засобів КД (ЗКД) і об'єктів КД (ОКД), що діють взаємно.

Розглянемо узагальнені структурні схеми СКД. Виділяючи як основну ознаку тип впливів, які використовуються під час контролю й діагностування, проаналізуємо структурні схеми *систем робочого й тестового контролю й діагностування* [10, 14, 15, 20, 27, 33].

7.1. Системи робочого контролю і діагностування

Структурну схему системи робочого КД зображено на рис. 7.1, а [10].

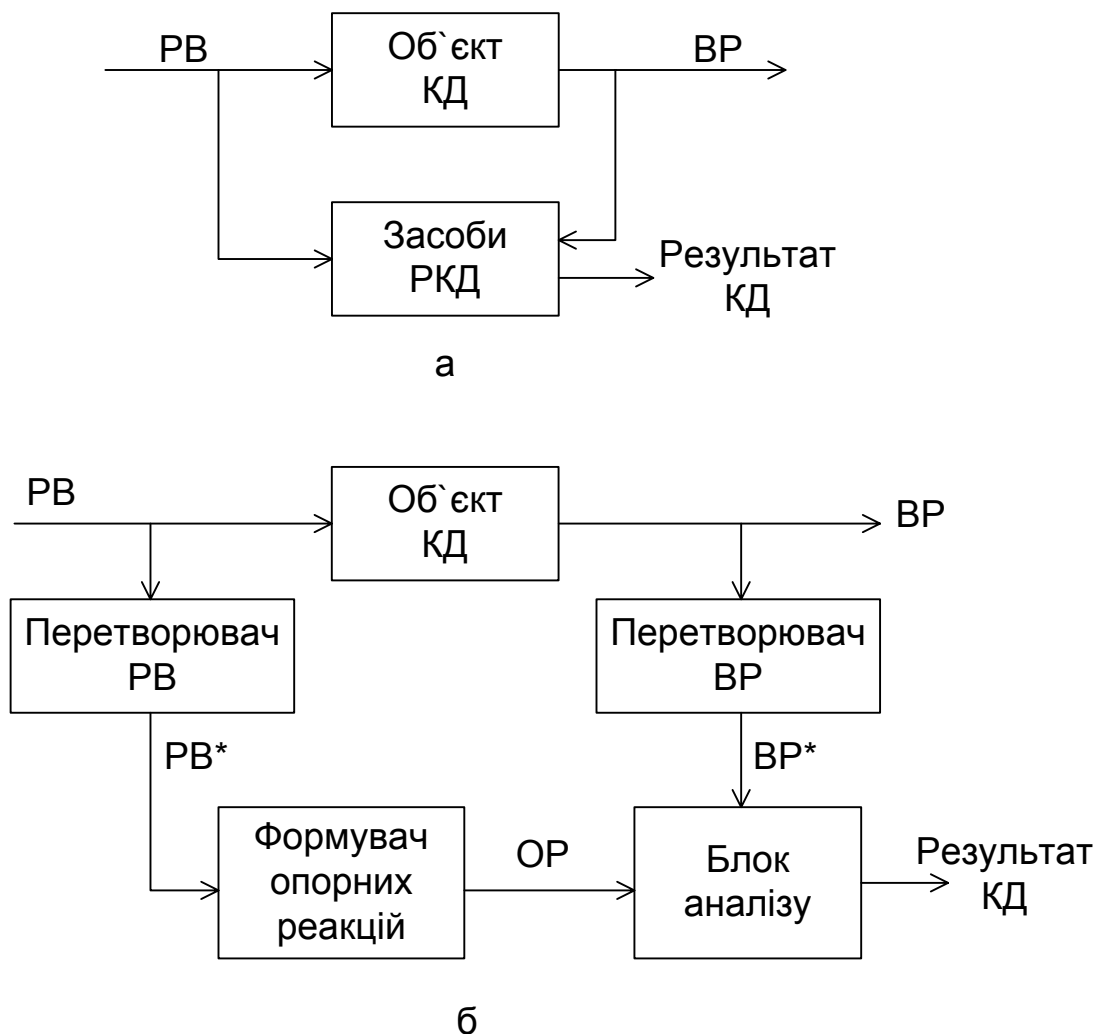


Рис. 7.1. Система робочого КД: а – узагальнена схема; б – розгорнена схема

Процес розпізнання технічного стану здійснюється з використанням робочих впливів (РВ) під час виконання об'єктом КД функцій, які покладено на нього. Результат контролю й діагностування (РКД) формується засобами робочого КД (ЗРКД) на основі зіставлення робочих вхідних впливів (РВ) і вихідних реакцій (ВР) об'єкта.

Більш детальну структурну схему системи робочого контролю й діагностування показано на рис. 7.1, б. Серцевиною процесу розпізнання ТС під час контролю й діагностування є порівняння послідовностей вихідних реакцій або еквівалентних їм послідовностей з очікуваними реакціями, тобто вихідними послідовностями, які формуються певною еталонною моделлю працездатного об'єкта. На основі цього порівняння (аналізу) здійснюється висновок щодо технічного стану ОКД. Таким чином, засоби робочого контролю й діагностування містять:

— *перетворювач робочих впливів* (ПРВ), який виконує перетворення впливів РВ, що знаходяться на вхід ОКД під час його функціонування за призначенням, на впливи РВ*, які є найбільш зручною (компактною) формою задання робочих впливів для їх подання на входи еталонної моделі та наступного опрацювання й аналізу;

— *перетворювач вихідних реакцій* (ПВР), який здійснює перетворення вихідних сигналів ОКД на ВР, які є необхідними для порівняння з очікуваною реакцією, його призначення й функції є аналогічними призначенню й функціям блока ПРВ;

— *формував очікуваних реакцій* (ФОР), який призначено для генерації сигналів, що відповідають працездатному об'єкту під час подання на нього відомих робочих впливів РВ (РВ*). ФОР моделює за певним законом функціонування працездатного об'єкта;

— *блок аналізу* (БА), який призначено для порівняння (зіставлення й аналізу) кодів очікуваної реакції і реформованої вихідної реакції ОКД з наступним формуванням результату контролю й діагностування (визначення номера технічного стану, у якому перебуває об'єкт).

Для конкретної схемотехнічної реалізації ОКД у засобах робочого КД може не бути деяких із визначених блоків або частина блоків цих засобів може об'єднатись з об'єктом контролю й діагностування чи повторювати його частини. Наприклад, під час контролю працездатності методом дублювання перетворювачі робочих впливів і вихідних реакцій можуть бути вимкненими, формував очікуваних реакцій являти собою прилад, аналогічний ОКД, а блок аналізу — схему порівняння.

7.2. Системи тестового контролю і діагностування

Під час тестового контролю й діагностування для розпізнання технічного стану здійснюється повне або часткове (тимчасове) відімкнення ОКД від виконання основних функцій та використовуються спеціальні тестові впливи (рис. 7.2, а). Підмикання об'єкта контролю й діагностування

до засобів тестового КД (ЗТКД) здійснюється з допомогою комутаторів К1 і К2, якими можна керувати як зовнішніми сигналами, так і сигналами, створеними ОКД або ЗТКД.

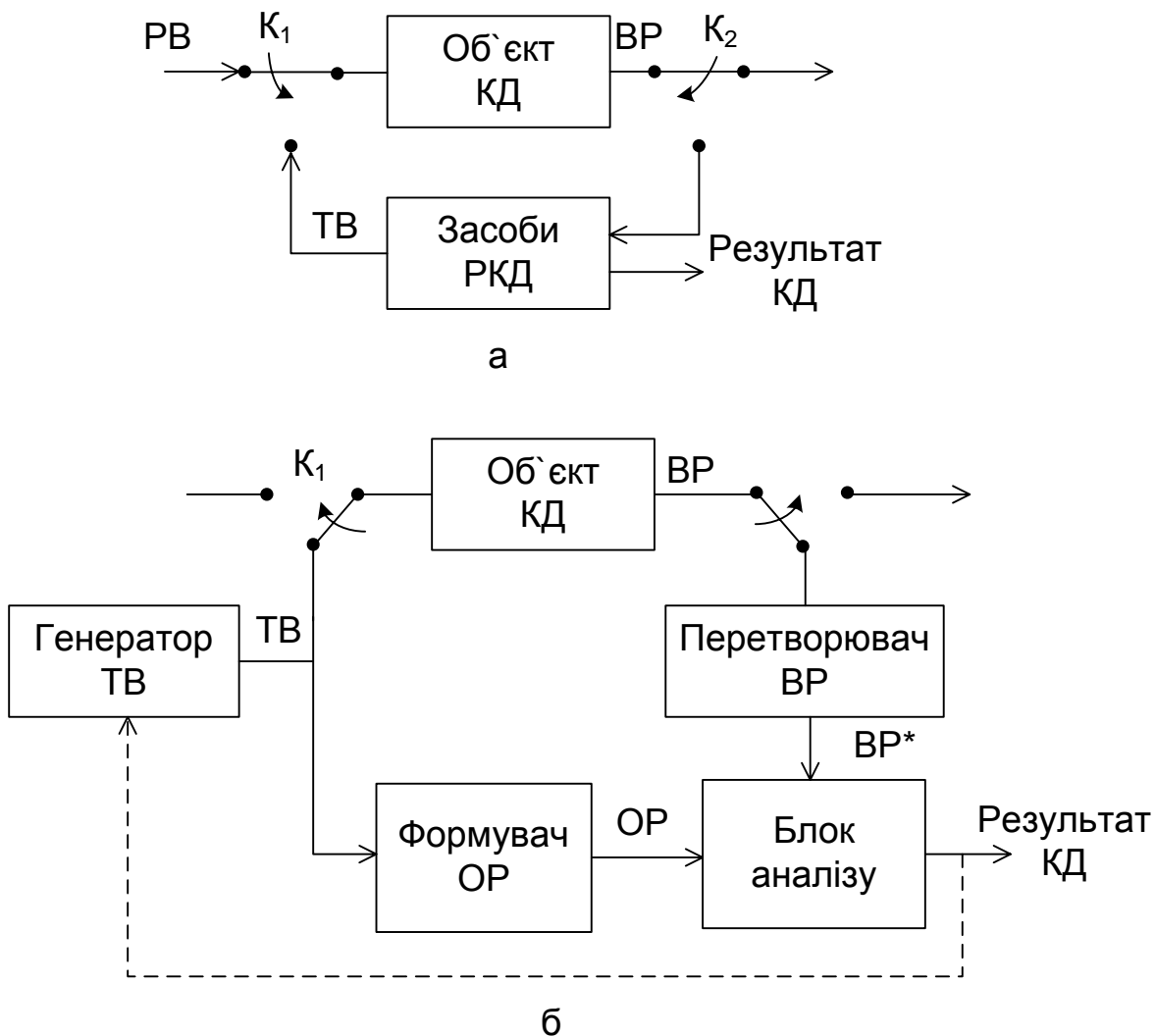


Рис. 7.2. Організація тестового КД: а – узагальнена схема; б – розширена схема [15]

На рис. 7.2, б показано більш детальну структурну схему системи тестового контролю й діагностування, яка має блоки ФОР, БВР і БА, що виконують функції, описані вище для систем робочого КД. Принциповою відмінністю тестового КД є наявність спеціального блока, який здійснює формування тестових впливів.

Цей блок має назву генератора тестових впливів (ГТВ), який за певним законом (програмою) видає ТВ, які надходять як на ОКД, так і на формувач очікуваних реакцій. В іншому робота цієї схеми, а саме її блоків ФОР, ПВР та БА, схожа з роботою системи робочого КД, хоча в них ці засоби зазвичай потребують великих апаратурних затрат.

Таким чином, якщо в системах робочого контролю й діагностування для визначення технічного стану не потребується відімкнення ОКД і певною мірою використовується апаратурна надмірність, то в системах тестового

КД завдання перевірки вирішується завдяки введенню часової надмірності.

Апаратурні затрати на засоби тестового КД можна суттєво знизити завдяки програмній реалізації функції блоків ГТВ, ФОР, БА.

Системи робочого КД пристосовані до виявлення як стійких відмов, так і збоїв, тоді як системи тестового КД дають змогу виявляти й локалізувати лише відкази об'єкта перевірки.

7.3. Структурні схеми узагальнених систем контролю і діагностування

В системах КІВ, які виконують найбільш відповідальні функції і перебувають в режимі чергування, важливо не тільки забезпечити безперервний контроль працездатності, готовності до використання, але й оперативно локалізувати дефект і замінити вузол КІВ, який відмовив. Під час використання КІВ за призначенням, наприклад під час виконання технологічного процесу плавлення металу, ще більше потрібні оперативне виявлення порушення функціонування, з'ясування його причин і забезпечення автоматичного відновлення інформаційно-керувальних процесів шляхом реконфігурації структури СКК, рестарту задачі тощо. Очевидно, що такі вимоги можна виконати лише за наявності засобів як робочого, так і тестового контролю й діагностування. Системи, які мають такі узагальнені засоби (УЗ), будуть мати назву *узагальнених систем контролю й діагностування (УС КД)*.

Структурні схеми узагальнених систем КД зображено на рис. 7.3.

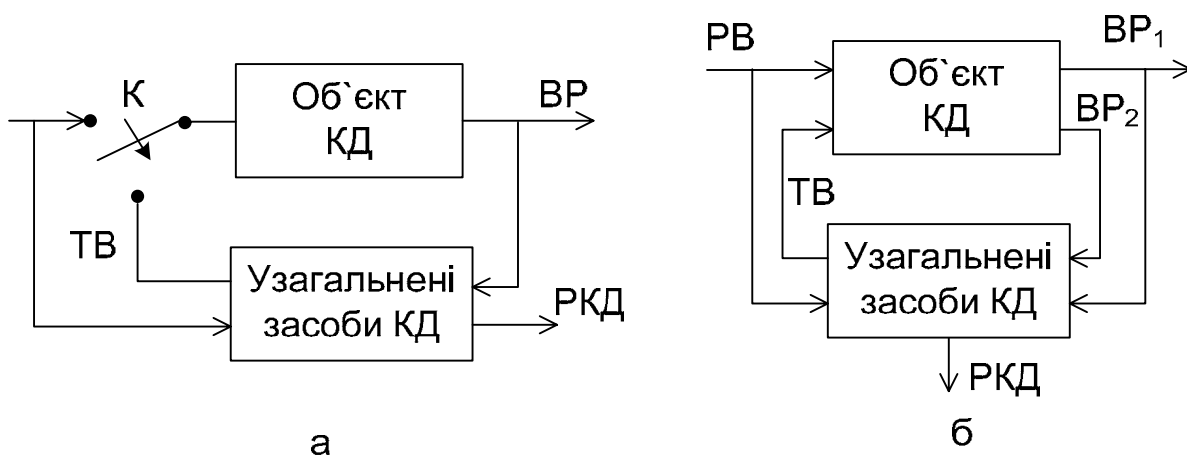


Рис. 7.3. Структурні схеми узагальнених систем КД

У першому випадку (рис. 7.3, а) в системі перехід з одного режиму контролю й діагностування в другий здійснюється з допомогою комутатора *K*. У цьому варіанті УС КД по черзі виконують робоче й тестове діагностування. У другому варіанті узагальненої системи КД (рис. 7.3, б)

передбачено можливість паралельного проведення робочого й тестового контролю й діагностування без відімкнення об'єкта КД від виконання основних функцій. Така організація узагальненої системи КД може мати місце, якщо, наприклад, не всі частини об'єкта працюють одночасно. Тоді блоки, які перебувають в режимі очікування, піддають тестовому КД шляхом подання тестових впливів ТВ та аналізу вихідних реакцій $ВР_2$, а блоки, які виконують основні функції, діагностуються засобами робочого КД шляхом зіставлення робочих впливів РВ і вихідних реакцій цих блоків $ВР_1$.

Розгорнуті структурні схеми розглянутих варіантів узагальнених систем контролю й діагностування зображено на рис. 7.4 і 7.5.

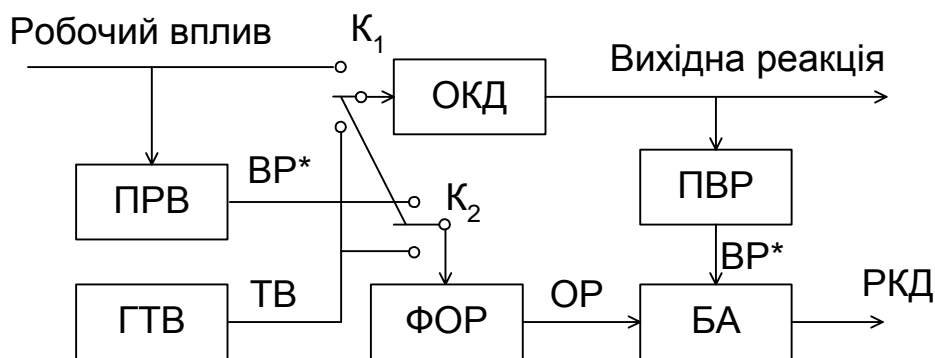


Рис. 7.4. Узагальнена схема КД (варіант 1)

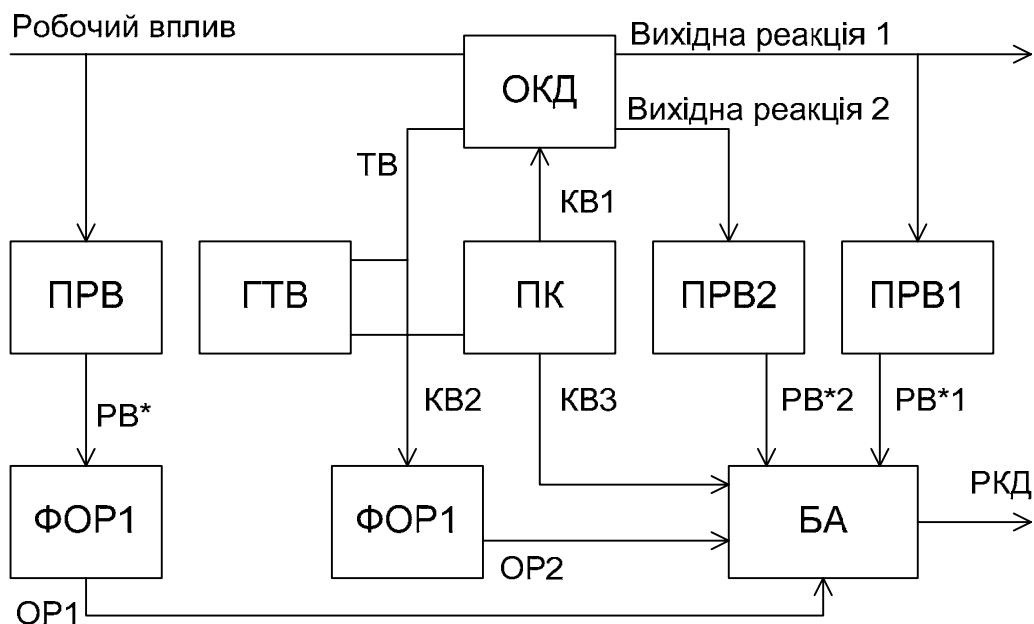


Рис. 7.5. Узагальнена схема КД (варіант 2)

У першому випадку (див. рис. 7.4) показано варіант реалізації узагальненої схеми РКД, у якому формувач очікуваних реакцій ФОР, перетворювач вихідних реакцій ПВР і блок аналізу є загальними засобами

для виконання функцій робочого й тестового контролю й діагностування. У другому випадку (див. рис. 7.5) ці засоби майже цілком (за винятком блоку аналізу) поділено і вони мають свої індивідуальні формувачі ФОР1, ФОР2 і перетворювачі ПВР1, ПВР2.

У такій схемі для узгодження роботи наведених засобів запроваджено спеціальний блок — пристрій координації ПК, який формує координувальні впливи KB_1 , KB_2 і KB_3 . Впливи KB_1 подаються на об'єкт контролю й діагностування для забезпечення можливості доступу до його частин, які простоюють, з метою їх тестування.

Впливи KB_2 і KB_3 здійснюють пуск генератора тестових впливів і настроєння блока аналізу на прийняття й оброблення інформації, а також формування результатів робочого й тестового КД.

Можливі й інші варіанти будування схем узагальнених систем контролю й діагностування, у яких здебільше враховуються особливості організації об'єкта КД, умови його застосування й вимоги, які ставлять до технічних характеристик.

7.4. Особливості елементів комп'ютерно-інтегрованих виробництв як об'єктів контролю і діагностування

Ефективність будь-якої системи контролю й діагностування насамперед залежить від того, наскільки глибоко й повно враховано специфіку об'єкта КД. Це певною мірою стосується систем КД КІВ.

Проаналізуємо основні особливості КІВ і їх підсистем як об'єктів контролю й діагностування [2, 5, 9, 13, 16, 20, 29, 34].

1. КІВ — це складний технічний комплекс, який складається з великої кількості систем і підсистем. Іншими словами, КІВ є об'єктом контролю й діагностування надзвичайно великої розмірності, оскільки має сотні й тисячі контрольованих параметрів.

2. КІВ містить не лише велику кількість компонент. Ці компоненти (підсистеми, вузли, пристрої) різняться своєю природою, принципами будування. До складу КІВ належать як цифрові, так і неперервні (аналогові) підсистеми, які містять як апаратні, так і програмні засоби. У них використовується різноманітна елементна база — інтегральні мікросхеми, реле, датчики і т.ін. Це створює додаткові труднощі під час контролю й діагностування.

3. Системи КІВ різняться різноманітністю режимів експлуатації, до яких належать зберігання (перебування у вимкненому стані), черговий режим, коли у ввімкненому стані перебуває частина систем, основне функціонування під час пуску виробничого процесу, коли всі системи працюють з повним навантаженням. Ці обставини зумовлюють необхідність наявності широкого спектра засобів контролю й діагностування.

4. До складу систем КІВ належить велика кількість комп'ютерів — від

універсальних суперкомп'ютерів до вбудованих мікроЕОМ, які виконують функції локальних контролерів на нижчих рівнях ієрархії керування. Частина з них можна об'єднати в мережі, що дає змогу перерозподіляти функції й завдання у разі відмов.

Таким чином, з одного боку, комп'ютери є складними об'єктами контролю й діагностування, а з іншого — вони самі можуть використовуватись як засоби КД.

5. У роботі систем КІВ може брати участь людина, яка виконує функції оператора — важливої ланки засобів автоматизації. Оператор бере участь у здійсненні операцій контролю й діагностування, приймає рішення щодо технічного стану підсистем КІВ. Водночас він також має розглядатись як об'єкт контролю й діагностування, оскільки може допускати помилкові дії, які обумовлюють порушення функціонування підсистем і вузлів КІВ.

6. Окремі компоненти КІВ — пункти контролю й керування, модулі робототехніки тощо — можуть бути значно віддаленими один від одного, що перешкоджає автоматичному здійсненню процесу контролю й діагностування, збору інформації щодо технічного стану та потребує розвинутих телемеханічних засобів, які дають змогу передавати необхідну інформацію між об'єктами КІВ.

7. КІВ зазвичай є об'єктами тривалого й критичного використання. Підвищені вимоги до їх надійності й готовності пояснюються великими матеріальними затратами на їх будівництво й експлуатацію, катастрофічними наслідками, які можуть мати місце при відмовах окремих підсистем КІВ.

Отже, розглянуті причини обумовлюють жорсткі вимоги до технічних характеристик засобів контролю й діагностування, які мають забезпечити оперативне виявлення порушень у функціонуванні (втрати працездатності) підсистем КІВ, локалізацію дефектів з високою імовірністю й заданою розрізнявальною здатністю.

7.5. Принципи організації контролю і діагностування комп'ютерно-інтегрованих виробництв

Аналіз особливостей систем КІВ як об'єктів КД і вимог до систем контролю й діагностування (СКД) дають змогу зробити висновок про те, що вони є досить складними системами. Ці системи є основою *систем керування технічним станом* (СКТС) КІВ (рис. 7.6).

Задачами СКТС КІВ є не лише розпізнання технічного стану підсистем і вузлів КІВ, але й керування цим станом з допомогою програмного рестарта алгоритмів під час виникнення збоїв, переходу на резервні канали й вибору працездатних конфігурацій для маскування відмов, заміни дефектних блоків обслуговим технічним персоналом тощо.

У разі реалізації гнучких стратегій керування технічним станом СКТС після ідентифікації відмови здійснює аналіз його впливу на готовність

систем КІВ до використання, оцінює можливості виконання задач з «накопиченням» дефектів, визначає оптимальні послідовність і терміни здійснення ремонтно-відновлюваних робіт. Зі свого боку СКТС є однією з підсистем загальної системи керування (СК) КІВ, яка крім задач керування технічним станом здійснює інші управлінські функції (вибір режимів роботи, керування технологічними процесами їх реалізації тощо). Виконання основних функцій СК КІВ, СКТС і СКД може здійснюватись як окремими, так і спільними технічними засобами, тобто на основі централізованої структури.

У такій структурі здійснюється принцип функціональних підсистем, кожна з яких має свої задачі, програмні засоби й засоби апаратної підтримки. Можливим є також інший підхід до декомпозиції систем і об'єктів керування, контролю й діагностування (ОККД) КІВ, який відрізняється тим, що СК КІВ, СКТС і СКД поділяються на N підсистем, що здійснюють керування, контроль і діагностування окремих об'єктів ОККД _{i} , $i = \overline{1, N}$.

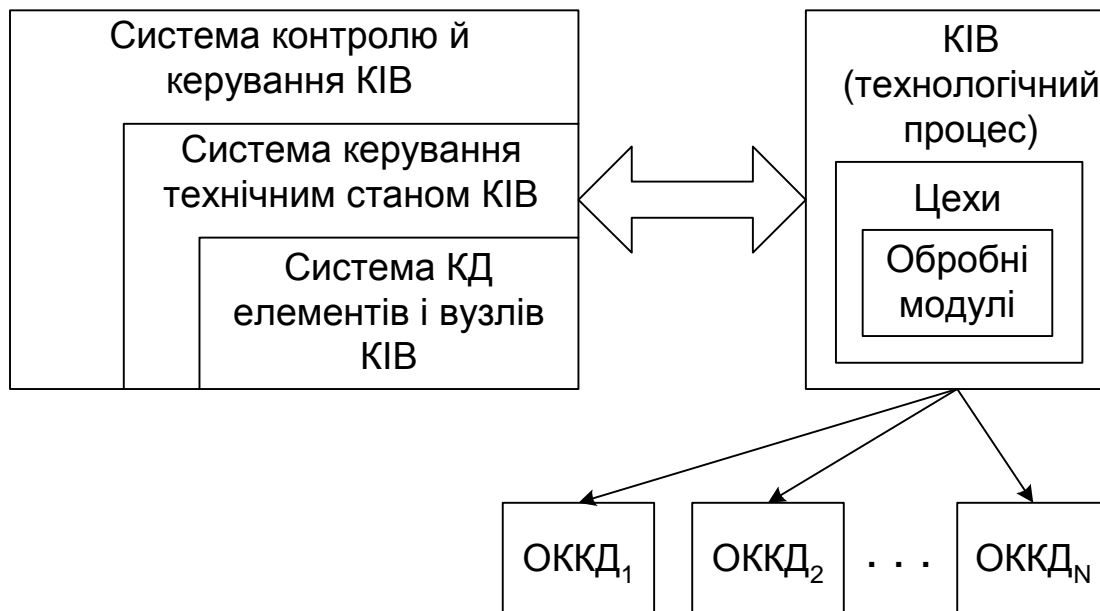


Рис. 7.6. Місце КД об'єктів у системі контролю й керування КІВ

Розглянемо конкретні варіанти структурної організації систем контролю й діагностування КІВ, що складається з пункту контролю й керування і віддаленої технологічної лінії. Обмін інформацією між ними здійснюється з використанням телемеханічної системи (ТМС).

У першому випадку (рис. 7.7) реалізується система тестового контролю й діагностування з *централізованим* принципом будування, яка містить спільні засоби генерації тестових впливів (ГТВ), формування очікуваних реакцій (ФОР) і блок аналізу (БА). Кожен з об'єктів контролю й діагностування **ОКД₁**, ..., **ОКД_N** має індивідуальні засоби перетворення вихідних реакцій **ПРВ _{i}** , $i = \overline{1, N}$ [14].

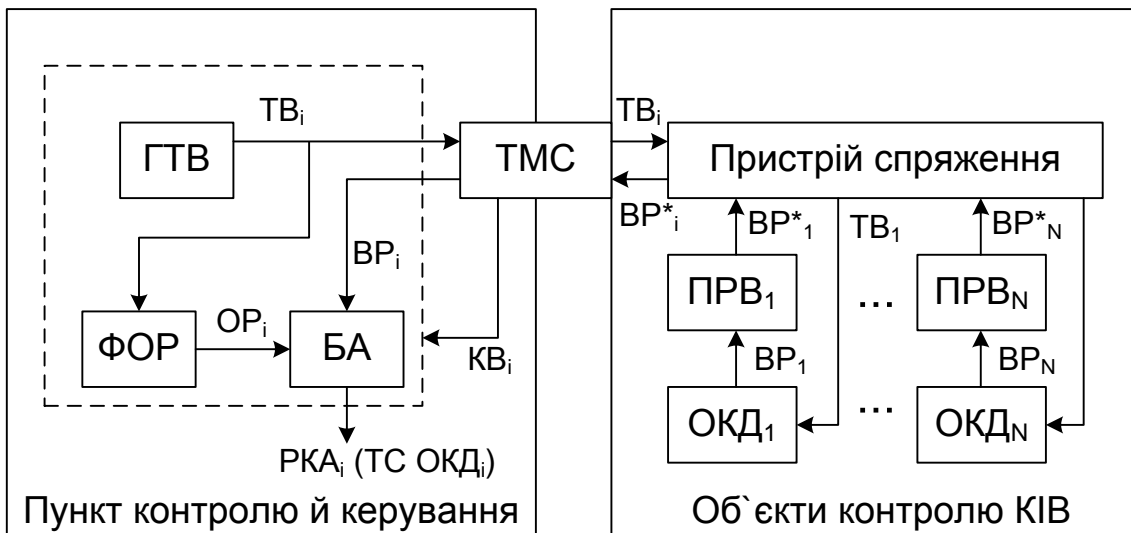


Рис. 7.7. Структурна схема тестового КД об'єктів (технологічних процесів) КІВ

Наведені засоби взаємодіють через ТМС і пристрої спряження, які розташовано на технологічній лінії. Через засоби спряження з пункту контролю й керування на ОКД_{*i*} подаються тестові впливи ТВ_{*i*}, а в протилежному напрямку — перетворені вихідні реакції ВР_{*i*}.

Налаштування систем контролю й діагностування на роботу з відповідним об'єктом здійснюється з допомогою координаційних впливів КВ_{*i*}^{*}. При поданні такого впливу ТМС і пристрій спряження організовують канал зв'язку між потрібним об'єктом і засобами КД, які розташовано на пункті контролю й керування і програмно налагоджено на роботу з вибраним об'єктом. За результатами контролю й діагностування *i*-го ОКД формуються результати РКД_{*i*} та отримується інформація щодо його технічного стану.

На рис. 7.8 показано варіант узагальненої системи контролю й діагностування з децентралізованою структурою. У цьому випадку кожний з об'єктів має свої індивідуальні (окремі) засоби робочого й тестового контролю й діагностування (**ОЗКД_{*i*}**, $i=1, N$).

На пункті контролю й керування розташовано блок аналізу (БА), який за результатами контролю й діагностування об'єктів РКД_{*i*} формує узагальнений результат — інформацію щодо технічного стану КІВ у цілому.

Алгоритм взаємодії розглянутих засобів може бути таким. Під час виконання функцій об'єктами КІВ здійснюється їх робочий КД. Результати такого контролю через пристрій спряження й ТМС надходять до блоку БА, де аналізуються.

Згідно з результатами цього аналізу системою керування або оператором приймається рішення (на аварійне вимикання об'єкта, здійснення поглибленого тестового КД з метою локалізації блока, що відмовив, та ін.) і формується відповідний координаційний вплив КВ_{*i*}.

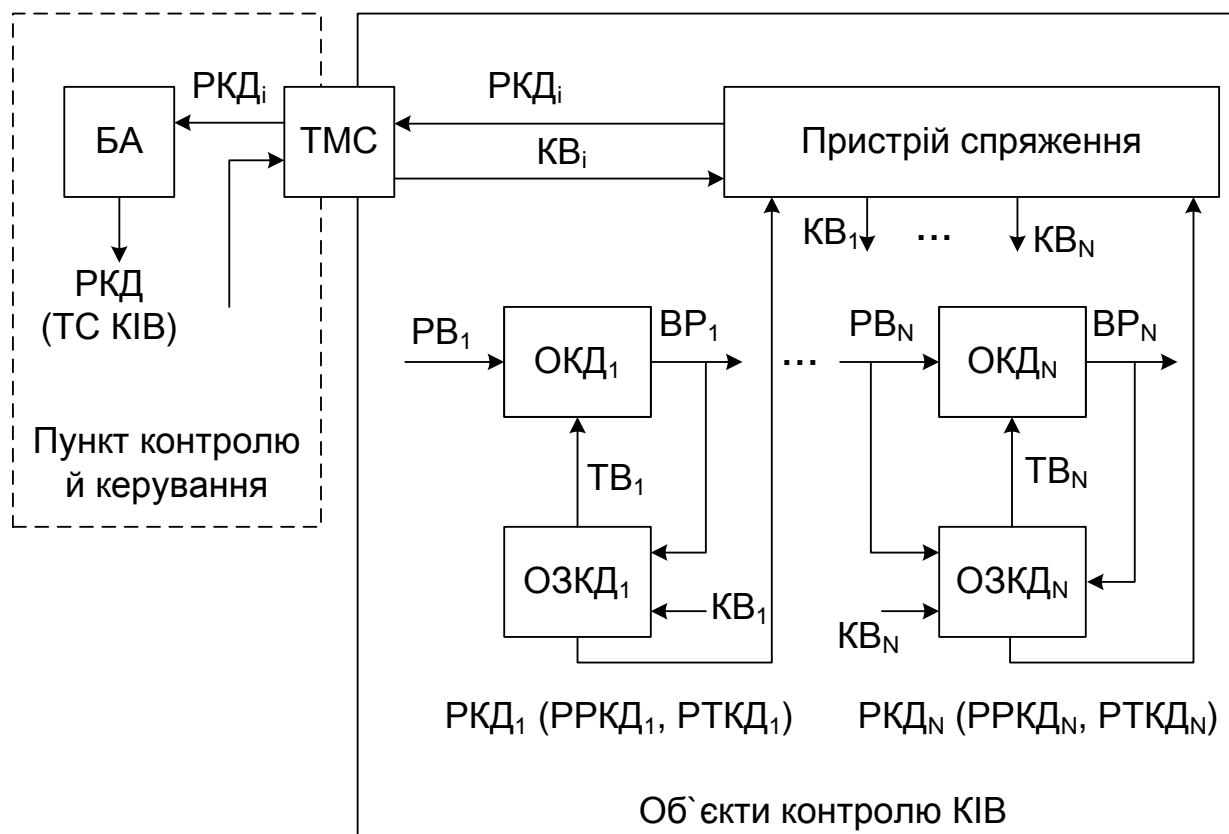


Рис. 7.8. Структурна схема узагальненої системи КД КІВ з децентралізованими засобами

Якщо треба провести тестовий КД вибраного об'єкта OKD_i , то після передання цього впливу через ТМС і прилад спряження на $OZKDi$ здійснюється тестування цього об'єкта. Результат тестового контролю й діагностування $OKDi$ подається на пункт контролю й керування, де формуються наступні координаційні впливи.

Аналіз варіантів організації систем контролю й діагностування (щодо тестових засобів) дає змогу зробити деякі висновки.

Перший варіант СКД відрізняється незначними апаратними затратами, оскільки основна частина засобів КД є загальною для всіх об'єктів, але потребує значних часових затрат. Такі витрати необхідні для передання вихідних реакцій від OKD і тестових впливів на OKD між пунктом контролю й керування і технологічною лінією.

Другий варіант потребує суттєвих апаратних витрат, але відрізняється підвищеною оперативністю контролю й діагностування, оскільки на пункт контролю й керування передаються лише результати КД об'єктів.

Вибір того чи іншого варіанта організації систем контролю й діагностування визначається специфікою КІВ і вимогами, які ставляться до нього.

Контрольні запитання

1. Наведіть структурну схему системи робочого контролю й діагностування.
2. Наведіть структурні схеми систем тестового контролю й діагностування.
3. Обґрунтуйте особливості елементів комп'ютерно-інтегрованих виробництв як об'єктів контролю й діагностування.
4. Наведіть принципи організації контролю й діагностування комп'ютерно-інтегрованих виробництв.
5. Обґрунтуйте складові структурної схеми тестового КД об'єктів (технологічних процесів) КІВ.
6. Обґрунтуйте місце КД об'єктів у системі контролю й керування КІВ.
7. Які складові утворюють узагальнену схему робочого КД?
8. Які складові утворюють узагальнену схему тестового КД?
9. Обґрунтуйте призначення перетворювача робочих впливів.
10. Обґрунтуйте призначення перетворювача вихідних реакцій.
11. Обґрунтуйте призначення формувача очікуваної реакції.
12. Обґрунтуйте місце засобів РКД об'єктів у системі контролю й керування КІВ.
13. Обґрунтуйте функції і призначення блока аналізу.
14. Які складові утворюють узагальнену схему тестового КД?
15. Обґрунтуйте призначення телемеханічної системи.

8. ПОКАЗНИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ І ДІАГНОСТУВАННЯ

8.1. Показники пристосованості об'єктів до контролю і діагностування

Показники ефективності систем контролю й діагностування підсистем КІВ будуть тим вищими, а складність засобів КД тим нижча, чим краще об'єкт буде пристосованим до вирішення завдань розпізнавання його технічного стану. Пристосованість об'єкта до контролю й діагностування може вимірюватися кількістю контрольних точок, з яких знімається інформація, розмірністю компонент, які можна вичленити з об'єкта при КД, тощо. Якісний графік залежності складності (вартості) об'єкта ($C_{окд}$), засобів ($C_{зкд}$) і систем КД в цілому ($C_{скд}$) від пристосованості ОКД до контролю й діагностування показано на рис. 8.1. Якщо при проектуванні об'єкта не застосовувалися спеціальні заходи для підвищення його пристосованості P_o до КД, то складність систем контролю й діагностування $C_{скд}^o$, що залежить від складності об'єкта $C_{окд}^o$ і засобів перевірки $C_{зкд}^o$, буде максимальною.

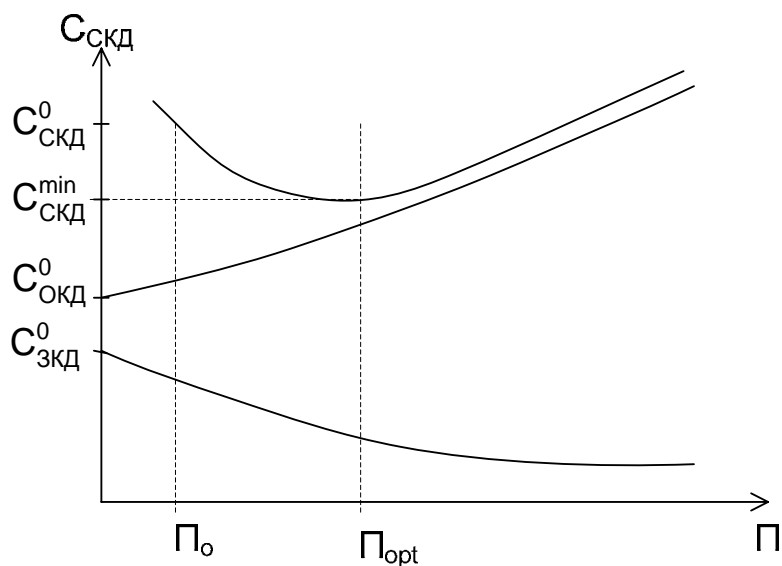


Рис. 8.1. Графік залежності $C_{СКД} = f(P)$

Зі збільшенням пристосованості об'єкта до контролю й діагностування складність засобів контролю й діагностування буде швидко зменшуватися, а збільшення складності самого об'єкта компенсуватися. Це забезпечує зменшення сумарної складності системи КД. Після досягнення рівня пристосованості P_{opt} сумарна складність системи знову почне збільшуватися, що зумовлено подальшим збільшенням складності об'єкта при незначному зменшенні складності засобів КД.

Таким чином, існує реальна можливість зменшення складності систем контролю й діагностування на величину

$$\Delta C_{СКД} = C_{СКД}^0 - C_{СКД}^{min},$$

де $C_{СКД}^{min} = C_{СКД}$ при $P = P_{opt}$.

Залежно від типу процесу КД, відносно якого виявляється пристосованість об'єкта, розрізняють *діагностовність*, *контролепридатність* і *пошукопридатність*.

Діагностовність — це властивість об'єкта, яка характеризує його пристосованість до здійснення технічного діагностування певними засобами.

Контролепридатність — це властивість об'єкта, яка характеризує його пристосованість до здійснення контролю технічного стану певними засобами.

Пошукопридатність — це властивість об'єкта, яка характеризує його пристосованість до здійснення пошуку дефекту певними засобами.

Кожну з розглянутих властивостей можна поділити залежно від того, до яких засобів КД (зовнішніх чи внутрішніх) є пристосованим об'єкт перевірки. Наприклад, діагностовність поділяється на *зовнішню* і *внутрішню*.

Зовнішня діагностовність — це властивість об'єкта, яка характеризує його пристосованість до здійснення зовнішнього діагностування (зовнішніми засобами діагностування), а *внутрішня діагностовність (самодіагностовність)* — це властивість об'єкта, яка характеризує його пристосованість до самодіагностування, тобто до здійснення діагностування вбудованими засобами.

Очевидно, що на основі введених раніше визначень і класифікацій процесів і засобів КД можна визначити інші властивості, наприклад, тестову й робочу контроле- і пошукопридатність. Важливими компонентами тестопридатності є поняття керованості й спостережуваності. *Керованість* — це пристосовність об'єкта до забезпечення керованої подачі вхідних (тестових) впливів до різних його елементів. *Спостережуваність* — це пристосованість об'єкта до забезпечення впливу вихідних реакцій його елементів на вихідні реакції об'єкта. Об'єднання властивостей керованості й спостережуваності складає властивість КС-доступності.

Кожна з розглянутих властивостей може мати кількісне оцінювання складності [11, 12, 20]. Забезпечення потрібного рівня цих властивостей пов'язане з додатковими апаратурними, часовими, інформаційними й іншими витратами. Розмір таких витрат значно зменшується, якщо завдання розроблення засобів КД і забезпечення пристосовності об'єкта до процесів контролю й діагностування вирішуються спільно із завданням проектування самого об'єкта КД КІВ.

8.2. Одиничні показники ефективності систем контролю і діагностування

Системи контролю й діагностування, як і будь-які складні технічні системи, характеризуються багатьма показниками. Однак серед цих показників можуть бути головні й другорядні. Такий розподіл залежить від мети і завдань системи, і тих обмежень, які впливають на їх досягнення. Основними завданнями системи КД є розпізнання технічного стану об'єкта.

Отже, показники систем контролю й діагностування мають забезпечувати кількісне оцінювання того, наскільки повно й правильно визначено технічний стан об'єкта, наскільки точно й оперативно вирішено це завдання, які при цьому були потрібні затрати та ін. Найбільш застосовуваними одиничними показниками ефективності процесу контролю й діагностування є повнота, глибина й оперативність, безвідмовність і складність засобів контролю й діагностування.

8.2.1. Повнота контролю і діагностування

При класифікації процесів і засобів КД як одна з основних ознак, за якими здійснювався їх розподіл, використовувався ступінь охоплення

об'єкта контролем і діагностуванням. Залежно від цього розрізняють повний і частковий КД.

Для забезпечення повного КД необхідно здійснювати перевірку всіх параметрів і характеристик об'єкта, які впливають на його технічний стан. Якщо взяти ієрархію «параметр—характеристика—прилад—об'єкт» відповідно до якої об'єкт складається з приладів U_1, \dots, U_n , що мають різні характеристики Y_{i1}, \dots, Y_{imi} ($i = \overline{1, n}$), а характеристики, зі свого боку, визначаються значеннями параметрів $\Pi_{ij1}, \dots, \Pi_{ijej}$ ($i = \overline{1, n}$), ($j = \overline{1, m_j}$), то КД можна вважати повним, тоді як перевірено всі вертикальні ланцюжки розглядуваної ієрархії.

На практиці висновок щодо технічного стану об'єкта зазвичай робиться або за значеннями частини пристроїв, або за обмеженим набором характеристик, або за всіма характеристиками, але за обмеженим набором параметрів.

Отже, *повнота* КД оцінюється ймовірністю виявлення відмови, яка є в об'єкті (в системі КД в цілому, включаючи засоби КД):

$$L_n = \frac{Q_k}{Q}, \quad (8.1)$$

де Q_k — ймовірність відмови тієї частини об'єкта (системи), технічний стан якої можна розпізнати на основі оцінюваних параметрів, характеристик, приладів;

Q — ймовірність відмови об'єкта КД.

Очевидно, що повнота контролю й діагностування є безрозмірною величиною, причому $0 \leq L_n \leq 1$. Система КД, яка забезпечує виявлення будь-якої з відмов елементів або обладнання об'єкта (системи), має повноту КД, яка дорівнює одиниці. Якщо ж не виявлено жодної з відмов, то $L_n = 0$.

Вираз (8.1) можна перетворити з метою практичного застосування таким чином. Наприклад, якщо має місце експоненціальний закон розподілу часу безвідмовної роботи контрольованого об'єкта, то значення $Q(Q_k)$ знаходять таким чином:

$$Q(Q_k) = 1 - e^{-\lambda(\lambda_k)t} \approx \lambda(\lambda_k)t,$$

де $\lambda(\lambda_k)$ — інтенсивність відмов усієї системи (тієї її частини, відмови якої виявляють себе у вихідних реакціях і при КД).

Оцінимо значення L_n за виразом

$$L_n = \frac{\lambda_k}{\lambda}. \quad (8.2)$$

Формули (8.1) – (8.2) записано в припущенні, що будь-яку відмову, що виникає в контрольовній частині системи, буде обов'язково виявлено засобами контролю. Однак це припущення є правильним лише при використанні «ідеального» методу КД.

Звичайно, що кожний з розглянутих методів КД характеризується своєю здатністю виявляти відмови — значенням імовірності виявлення $P_{обн}$. Тоді повноту КД з урахуванням значення $P_{обн}$ можна визначити таким чином [10, 16]

$$L_{п}^* = L_{п} P_{обн}.$$

Цю величину часто називають методичною характеристикою системи контролю й діагностування.

8.2.2. Глибина контролю і діагностування

Процес КД є зазвичай процесом розпізнавання технічного стану із заданим ступенем деталізації. Під час контролю технічний стан об'єкта розпізнається з точністю до двох альтернатив: працездатний або непрацездатний (справний або несправний та ін.). При діагностуванні ступінь деталізації, тобто кількість розпізнаних станів, є значно більшим.

Для характеристики ступеня деталізації ТС, які розпізнаються, використовується спеціальний показник — *глибина контролю й діагностування*. Цей показник є якісною мірою точності (розрізнявальної здатності) локалізації відмови в об'єкті.

Глибина контролю забезпечується на рівні об'єкта в цілому, глибина діагностування — на рівні обладнання, блока, елемента (типового елемента заміни), інтегральної мікросхеми та ін. Чим точніше система КД здатна визначити причину відмови (місце дефекту), тим вище глибина діагностування. Сучасні системи КД складних цифрових систем забезпечують глибину діагностування на рівні одного-двох типових елементів заміни [15].

Глибина КД може характеризуватися кількісним оцінюванням

$$q_{кд} = \text{Card} (M_{скд}) - 1, \quad (8.3)$$

де $\text{Card} (M_{скд})$ — потужність (кількість елементів) множини $M_{скд}$, що складається з технічних станів, які розпізнає система КД.

Якщо система здатна здійснювати лише контроль ТС, то $q_{кд} = 1$, оскільки множина $M_{скд}$ у цьому випадку складається з двох елементів, тобто

$$M_{скд} = \{e(ТС_P), e(ТС_{\bar{P}})\},$$

які відповідають працездатному $e(TC_p)$ та непрацездатному $e(TC_{\bar{p}})$ станам системи.

Якщо система КД здатна визначити місце дефекту з точністю до пристрою (блока, елемента) за умов їх однотипності в об'єкті, то $q_{КД}$ буде дорівнювати кількості цих пристроїв (блоків, елементів). Цей частковий показник є виключно важливою характеристикою системи КД.

Чим більша глибина КД, тим з більшою точністю локалізується дефектний елемент. Це, зі свого боку, збільшує ефективність процесу відновлення, оскільки потребує меншого запасу резервних елементів (блоків). З іншого боку, збільшення глибини КД пов'язане зазвичай зі збільшенням часових витрат.

Це може спричинити збільшення сумарного часу відновлення і зменшення коефіцієнта готовності систем КІВ. Наведені обставини обумовлюють необхідність пошуку оптимальної глибини КД.

8.2.3. Оперативність контролю і діагностування

Важливим показником досконалості засобів КД і пристосованості об'єкта до КД є *оперативність* (час, тривалість) контролю й діагностування. Оперативність КД визначається математичним очікуванням інтервалу часу від моменту виникнення відмови (дефекту) t_1 до його виявлення t_2 під час контролю й моменту t_3 локалізації дефектного елемента під час діагностування (див. рис. 4.2):

$$T_K = T_{обн} = t_2 - t_1; \quad T_D = T_{обн} + T_{лок} = t_3 + t_1, \quad (8.4)$$

де $T_{обн}$ — математичне очікування часу виявлення відмови;

$T_{лок}$ — математичне очікування часу локалізації дефектного елемента.

У випадку тестового КД ці показники визначаються тривалістю виконання тесту працездатності й діагностичного тесту. Таким чином, оперативність КД характеризує тривалість переходу об'єкта перевірки із невизначеного в зафіксований або розпізнаний технічний стан.

Оперативність КД визначається досконалістю використовуваних методів і алгоритмів перевірки і суттєво залежить від пристосованості об'єкта до проведення КД. Найбільшої оперативності визначення ТС можна досягти в системах робочого КД, а також в узагальнених СКД, у яких застосовуються засоби контролю, вбудовані в об'єкт.

Оперативність КД є виключно важливою характеристикою для систем КІВ, оскільки визначає їхню технічну готовність перед початком виробництва, а під час виробництва (у реальному масштабі часу) має відповідати допустимим часовим затратам на контроль і пошук місця виникнення дефектів.

8.2.4. Безвідмовність засобів контролю і діагностування

Засоби КД призначено для швидкого виявлення відмови, щоб потім здійснити процес відновлення (заміни, реконфігурації) і тим самим підвищити надійність об'єкта. Однак засоби КД, зі свого боку, можуть зазнавати впливу відмов, за наявності яких правильне визначення технічного стану об'єкта є неможливим.

Отже, важливою характеристикою засобів КД є їх *безвідмовність*, тобто здатність безперервно зберігати свою працездатність. Її оцінюють відомими показниками безвідмовності: *імовірністю безвідмовної роботи засобів КД* $P_{зкд}(t)$, інтенсивністю відмов $\lambda_{зкд}$ та ін.

Значення $P_{зкд}(t)$ за умови найпростішого потоку відмов визначається таким чином:

$$P_{зкд}(t) = e^{-\Lambda t}, \quad (8.5)$$

де Λ – інтенсивність потоку відмов засобів КД.

Дуже важливими є й інші складові комплексної властивості надійності засобів КД (ремонтпридатність, довговічність, цілісність тощо), але далі будемо використовувати лише показник безвідмовності засобів КД $P_{зкд}(t)$.

8.2.5. Складність засобів контролю і діагностування

Безвідмовність засобів КД залежить насамперед від їх *складності*. Складність засобів КД є визначенням таких важливих характеристик, як вартість, масогабаритні розміри, потужність електроспоживання (що є дуже важливим, наприклад, для бортових систем контролю й діагностування літальних апаратів).

Для оцінювання складності засобів КД, яку доцільно співвідносити зі складністю об'єкта (системи) контролю, можна використати значення *коефіцієнта надмірності обладнання*:

$$K_{ио} = \frac{C_{скд} + C_{зкд}}{C_{скд}}, \quad (8.6)$$

де $C_{окд}$ ($C_{зкд}$) — кількість обладнання об'єкта (засобів) контролю й діагностування.

Кількість обладнання можна оцінити кількістю корпусів інтегральних схем, паяних контактів, плат та ін. Якщо припустити, що об'єкт і засоби КД побудовано на однотипних елементах, час безвідмовної роботи яких підпорядковано експоненціальному закону, то вираз (8.6) матиме такий вигляд:

$$K_{\text{ио}} = \frac{\lambda_{\text{СКД}} + \lambda_{\text{ЗКД}}}{\lambda_{\text{СКД}}} = \frac{\lambda}{\lambda_{\text{СКД}}}, \quad (8.7)$$

де $\lambda_{\text{окд}}$ ($\lambda_{\text{зкд}}$) — інтенсивності відмов об'єкта (засобів) КД, $\lambda = \lambda_{\text{окд}} + \lambda_{\text{зкд}}$.

Можна використати й інші показники ефективності систем КД, за якими оцінюють ті чи інші їхні властивості в підсистемах КІВ. Їх вибір залежить від специфіки об'єктів контролю й діагностування та вимог, які ставляться до засобів КД.

8.3. Достовірність функціонування систем робочого контролю і діагностування

Зробимо загальне оцінювання достовірності функціонування та інших показників ефективності систем робочого КД, припустивши щодо незалежність виникнення й виявлення дефектів об'єкта контролю й діагностування та засобів КД. Орім того, будемо вважати, що при працездатному стані ОКД і ЗРКД помилковий результат не можна сформулювати через недосконалість методу КД, а також що відмови засобів КД завжди призводять до видачі неправильних результатів.

Після того, як об'єкт контролю й діагностування та засоби КД об'єднано в єдину систему, виникає питання, які нові властивості має така система, як оцінити кількісний рівень цих властивостей та ефективність системи КД в цілому.

Щоб вирішити ці питання, згадаємо, що засоби контролю й діагностування дають змогу розпізнати технічний стан об'єкта. Таким чином, об'єкт із засобами КД мають дуже важливу властивість — властивість достовірного функціонування.

Під *достовірністю функціонування* розуміють властивість, яка характеризує правильність проміжних і остаточних результатів роботи об'єкта (системи), визначає його здатність фіксувати правильність і помилковість цих результатів. Для об'єктів, які не мають засобів контролю, властивість достовірності функціонування є еквівалентною властивості безвідмовності, тобто здатності безперервно зберігати працездатний стан протягом деякого часу (напрацювання). Кількісно рівень безвідмовності функціонування таких об'єктів можна оцінити величиною ймовірності безвідмовної роботи $P(t)$.

Розглянемо складові частини поняття достовірності функціонування для об'єкта з контролем. На рис. 8.2 наведено моделі розпізнання технічного стану об'єкта. Ці моделі різняться варіантами відповідності істинного технічного стану (ІТС), тобто того, у якому дійсно перебуває об'єкт, і розпізнаного технічного стану, тобто того, який визначено засобами контролю. Об'єкт може перебувати в двох станах: працездатному (незаштрихована область) і непрацездатному

(заштрихована область). Унаслідок контролю об'єкт можна визначити як працездатний (незаштрихована область) і непрацездатний (заштрихована область).

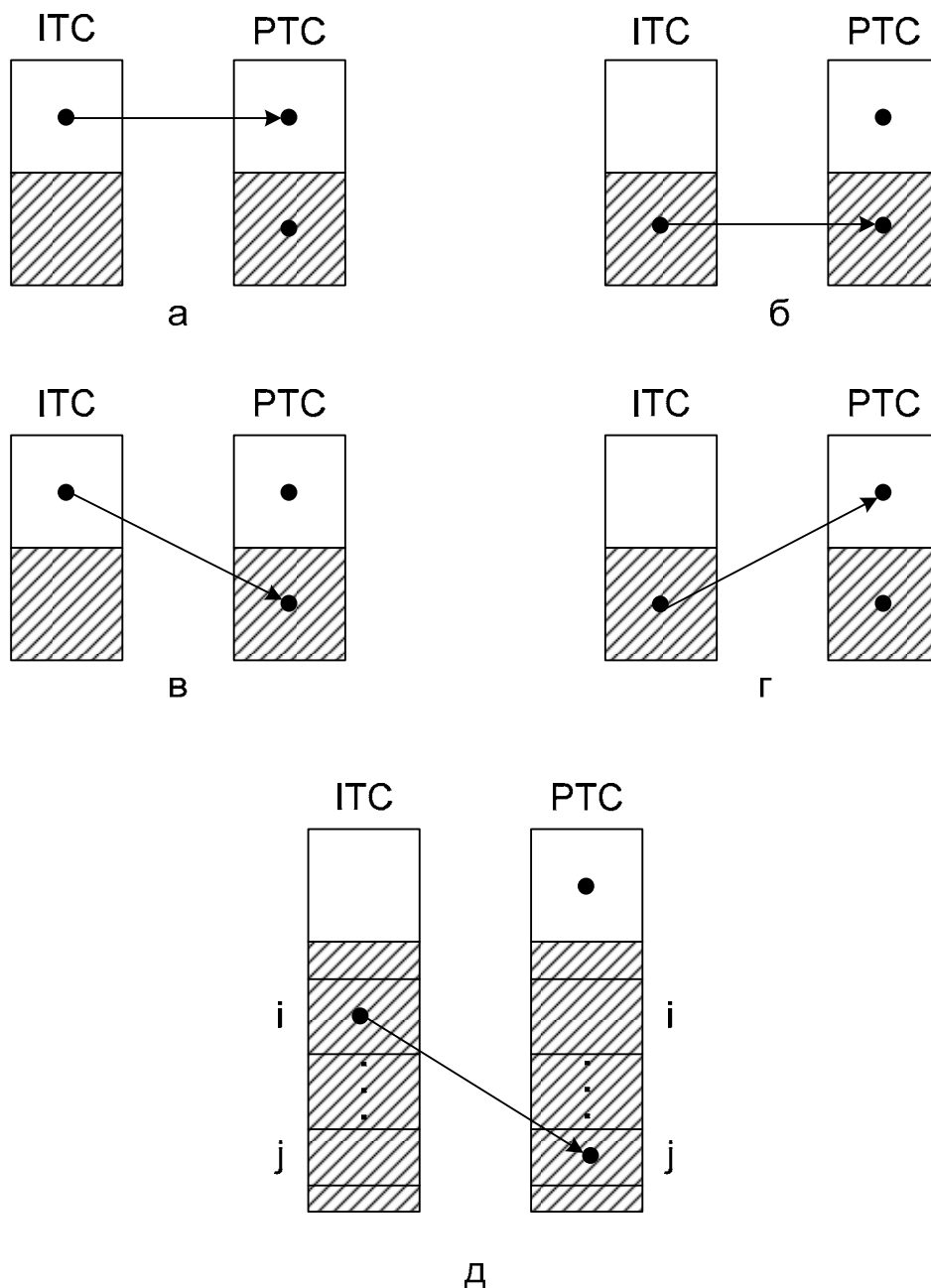


Рис. 8.2. Моделі розпізнання технічного стану під час контролю для правильної класифікації працездатного (а) і непрацездатного (б) об'єктів, неправильної класифікації працездатного (в) і непрацездатного (г) об'єктів і неправильної класифікації непрацездатного об'єкта при діагностуванні

Розглянемо можливі ситуації за результатами проведення КД.

Перша ситуація (рис. 8.2, а): об'єкт є працездатним і розпізнається під час контролю як працездатний.

Друга ситуація (рис. 8.2, б): об'єкт перебуває в непрацездатному стані

й визначається засобами контролю як непрацездатний.

Третя ситуація (рис. 8.2, в): об'єкт є працездатним, а визначається під час контролю непрацездатним. Такі помилки контролю називають *помилками першого роду, або ризиком постачальника*.

Четверта ситуація (рис. 8.2, г): непрацездатний об'єкт кваліфікується засобами контролю як працездатний. Помилки такого типу отримали назву *помилки другого роду, або ризику замовника*.

Достовірному функціонуванню системи відповідають перша й друга ситуації, у яких засобами контролю правильно визначається істинний технічний стан об'єкта. У третій і четвертій ситуаціях система функціонує недостовірно (неправильно, помилково), оскільки розпізнаний технічний стан не збігається з дійсним.

Недостовірне функціонування системи можливе також при діагностуванні (рис. 8.2, д), коли об'єкт перебуває в i -му несправному стані, а засоби діагностування визначають, що він перебуває в j -му несправному стані. Ці помилки засобів КД називають *помилками третього роду*.

Позначимо ймовірності чотирьох подій (ситуацій), які розглянуто під час контролю технічного стану (рис. 8.1, а–г) в момент часу t , через $P_{PP}(t)$ (див. рис. 8.2, а), $P_{HH}(t)$ (див. рис. 8.2, б), $P_{PH}(t)$ (див. рис. 8.2, в), $P_{HP}(t)$ (див. рис. 8.2, г), $P_{HHH}(t)$ (див. рис. 8.2, д), де нижній індекс складається з двох букв, які є показником істинного й розпізнаного технічних станів (P — працездатний, H — непрацездатний). Наприклад, $P_{PH}(t)$ — це ймовірність того, що об'єкт, який перебуває в працездатному стані, класифіковано як непрацездатний. Очевидно, що ці події становлять повну групу подій

$$P_{PP}(t) + P_{HH}(t) + P_{PH}(t) + P_{HP}(t) = 1.$$

Достовірність функціонування системи можна оцінити умовною ймовірністю (певністю) того, що засоби контролю правильно розпізнають істинний технічний стан об'єкта:

$$D(t) = \frac{P_{PP}(t) + P_{HH}(t)}{P_{PP}(t) + P_{HH}(t) + P_{PH}(t) + P_{HP}(t)}, \quad (8.8)$$

або спрощено:

$$D(t) = P_{PP}(t) + P_{HH}(t) = 1 - P_{PH}(t) - P_{HP}(t). \quad (8.9)$$

Позначимо через $\overline{D}(t)$ умовну ймовірність того, що засоби контролю неправильно розпізнають істинний технічний стан об'єкта (див. рис. 8.1, г), або ймовірність недостовірного функціонування:

$$D(t) = 1 - \overline{D}(t), \quad (8.10)$$

де $\bar{D}(t) = P_{PH}(t) + P_{HP}(t)$.

Отже, умовна ймовірність недостовірного функціонування визначається сумою ймовірностей помилок першого (P_{PH}) і другого (P_{HP}) роду.

Якщо розглянути процес діагностування, у якому можливі й помилки третього роду (див. рис. 8.1, д), то буде мати місце повна група подій:

$$P_{PP}(t) + P_{HHP}(t) + P_{HNO}(t) + P_{PH}(t) + P_{HP}(t) = 1,$$

де $P_{HHP}(t)$ і $P_{HNO}(t)$ — ймовірності помилкової класифікації технічного стану непрацездатного об'єкта, причому

$$P_{HHP}(t) + P_{HNO}(t) = P_{HN}(t). \quad (8.11)$$

Тоді з урахуванням формул (8.8) — (8.11) можна записати такі вирази:

$$D_{\phi} = \frac{P_{PP}(t) + P_{HHP}(t)}{P_{PP}(t) + P_{HHP}(t) + P_{PH}(t) + P_{HP}(t) + P_{HNO}(t)}, \quad (8.12)$$

$$\bar{D}_{\phi}(t) = P_{PH}(t) + P_{HP}(t) + P_{HNO}(t). \quad (8.13)$$

Аналіз отриманих формул дає змогу зробити висновок, що рівень достовірності функціонування системи визначається як безвідмовністю самого об'єкта, так і досконалістю засобів контролю й діагностування, тобто для об'єктів (систем), які мають засоби КД, на відміну від неконтрольованих об'єктів ця властивість має значно ширше тлумачення.

Досконалість засобів КД перш за все визначається достовірністю контролю й діагностування. *Достовірність* КД — це властивість засобів КД (або об'єкта, який містить в собі ці засоби) правильно розпізнати істинний технічний стан об'єкта. Іноді властивість достовірності функціонування ототожнюють із властивостями достовірності контролю й діагностування. Це не зовсім правильно, оскільки достовірність КД на відміну від достовірності функціонування не залежить від надійності (безвідмовності) об'єкта.

Зазначимо, що ймовірність $P_{PP}(t)$ того, що працездатний об'єкт буде визнано працездатним, залежить лише від рівня безвідмовності засобів КД, тоді як ймовірність правильної класифікації непрацездатного об'єкта P_{HN} визначається всіма компонентами достовірності контролю.

Розглянемо дві можливі ситуації:

1. *Засоби робочого КД контролюються так само, як і об'єкт КД.* Тоді ймовірність того, що працездатний об'єкт КД буде класифіковано засобами КД як працездатний, визначається виразом

$$P_{PP}(t) = P_{OKD}(t) P_{ЗРКД}(t), \quad (8.14)$$

де $P_{OKD}(t)$ та $P_{ЗРКД}(t)$ — імовірність безвідмовної роботи об'єкта й засобів робочого контролю й діагностування відповідно.

Імовірність правильного розпізнання технічного стану непрацездатного об'єкта $P_{НН}(t)$ можна визначити як добуток імовірностей подій, які пов'язані з порушенням працездатності об'єкта й засобів КД і виявлення відмови:

$$P_{НН}(t) = [1 - P_{OKD}(t) P_{ЗРКД}(t)] I_n P_{ОБН}(t), \quad (8.15)$$

де I_n і $P_{ОБН}(t)$ — повнота КД і ймовірність виявлення відмови, які дають характеристику застосовуваному методу КД.

Подія, коли непрацездатний об'єкт КД визнається непрацездатним, є можливою внаслідок неповного контролю або «неідеальної» здатності виявлення використовуваного методу. Імовірність цієї події — імовірність помилки першого роду $P_{НР}(t)$ — обчислюється за таким виразом:

$$P_{НР}(t) = [1 - P_{OKD}(t) P_{ЗРКД}(t)] (1 - L_n P_{ОБН}). \quad (8.16)$$

Імовірність помилки другого роду $P_{РН}(t)$ у цьому випадку дорівнює нулю, оскільки засоби КД контролюються разом з об'єктом, а їх відмова класифікується так само, як і відмова самого об'єкта КД.

Отже, вирази для достовірності $D_P(t)$ і недостовірності $D_{НР}(t)$ функціонування систем з робочим КД мають такий вигляд:

$$D_P(t) = P_{PP}(t) + P_{НН}(t) = P_{OKD}(t) P_{ЗРКД}(t) [1 - P_{OKD}(t) P_{ЗРКД}(t)] L_n P_{ОБН}(t); \quad (8.17)$$

$$D_{НР}(t) = P_{НР}(t) + P_{РН}(t) = [1 - P_{OKD}(t) P_{ЗРКД}(t)] (1 - L_n P_{ОБН}(t)), \quad (8.18)$$

де $P_{OKD}(t)$ — імовірність безвідмовної роботи об'єкта контролю й діагностування;

$P_{ЗРКД}(t)$ — імовірність безвідмовної роботи засобів робочого контролю й діагностування;

$P_{ОБН}(t)$ — імовірність виявлення відмови засобами робочого контролю.

Для використання формул (8.9) — (8.18) на практиці необхідно:

— визначити ймовірності безвідмовної роботи об'єкта і засобів КД — якщо експоненціальний закон відмов є правильним, то значення $P_{OKD}(t)$ і $P_{ЗРКД}(t)$ знаходять, користуючись виразами

$$P_{OKD}(t) = \exp(-\lambda_{OKD} t),$$

$$P_{ЗРКД}(t) = \exp(-\lambda_{ЗРКД} t),$$

де λ_{OKD} і $\lambda_{ЗРКД}$ — сумарні інтенсивності збоїв і відмов об'єктів і засобів

робочого контролю й діагностування;

— знайти повноту контролю з урахуванням виразу (8.2);

— обчислити значення ймовірності $P_{ОБН}(t)$, базуючись на особливостях використовуваного методу КД.

2. Засоби робочого КД не контролюються.

У цьому випадку для визначення ймовірностей розпізнання технічних станів об'єкта, достовірності й недостовірності його функціонування отримуємо такі вирази:

$$P_{PP}(t) = P_{OKD}(t)P_{ЗРКД}(t); \quad (8.19)$$

$$P_{НН}(t) = [1 - P_{OKD}(t)] L_n P_{ОБН} P_{ЗРКД}(t); \quad (8.20)$$

$$P_{НР}(t) = [1 - P_{OKD}(t)][1 - L_n P_{ОБН} P_{ЗРКД}(t)]; \quad (8.21)$$

$$P_{РН}(t) = P_{OKD}(t)[1 - P_{ЗРКД}(t)]; \quad (8.22)$$

$$D_P(t) = P_{OKD}(t)P_{ЗРКД}(t) + [1 - P_{OKD}(t)] L_n P_{ОБН} P_{ЗРКД}(t); \quad (8.23)$$

$$D_{НР}(t) = [1 - P_{OKD}(t)][1 - L_n P_{ОБН} P_{ЗРКД}(t)] + P_{OKD}(t)[1 - P_{ЗРКД}(t)]. \quad (8.24)$$

Для того щоб скористатися цими формулами, необхідно визначити ті самі компоненти, що й у першому випадку. Використовуючи отримані вирази, можна визначити величину збільшення достовірності функціонування при використанні робочого КД відносно неконтрольованого об'єкта. Для першого $\Delta D_{P_1}(t)$ і другого $\Delta D_{P_2}(t)$ випадків ця величина обчислюється з урахуванням формул (8.11) і (8.17) таким чином:

$$\Delta D_{P_1}(t) = P_{OKD}(t)P_{ЗРКД}(t) + [1 - P_{OKD}(t)] P_{ЗРКД}(t) L_n P_{ОБН}(t) - P_{OKD}(t); \quad (8.25)$$

$$\Delta D_{P_2}(t) = P_{OKD}(t)P_{ЗРКД}(t) + [1 - P_{OKD}(t)] L_n P_{ОБН}(t) P_{ЗРКД}(t) - P_{OKD}(t). \quad (8.26)$$

Зазначимо, що збільшення значення достовірності функціонування під час використання вбудованих засобів робочого КД супроводжується зменшенням безвідмовності відносно вихідного неконтрольованого об'єкта (системи) на величину

$$\Delta P(t) = P_{OKD}(t) - P_{OKD}(t)P_{ЗРКД}(t). \quad (8.27)$$

Отже, при оцінюванні ефективності систем КД слід враховувати як величину отриманого покращення в достовірності $\Delta D(t)$, так і величину погіршення в безвідмовності $\Delta P(t)$.

8.4. Достовірність функціонування систем тестового контролю і діагностування

У системах тестового контролю й діагностування для визначення технічного стану об'єкта КІВ необхідно відімкнути його від виконання основних функцій. Таке відімкнення можна проводити по-різному. В окремих випадках систему можна вивести з технологічного процесу КІВ і тестувати її спеціальною апаратурою КД. Ця ситуація є аналогічною до тестового КД, який проводиться на етапі виробництва й введення до експлуатації систем КІВ. В інших випадках тестування системи здійснюється під час технологічних процесів.

У КІВ періодично (у разі видачі об'єктами КД сигналів відмов — миттєво) з пункту керування засобами робочого КД виконуються команди щодо проведення тестового контролю. Мета такого контролю — визначення готовності підсистем КІВ до подальшого використання.

Тестовий КД може здійснюватися в режимі природного очікування або оперативно. Режими природного очікування (рис. 8.3, а) обумовлені інерційністю суміжних систем і паузами під час реалізації технологічних процесів.

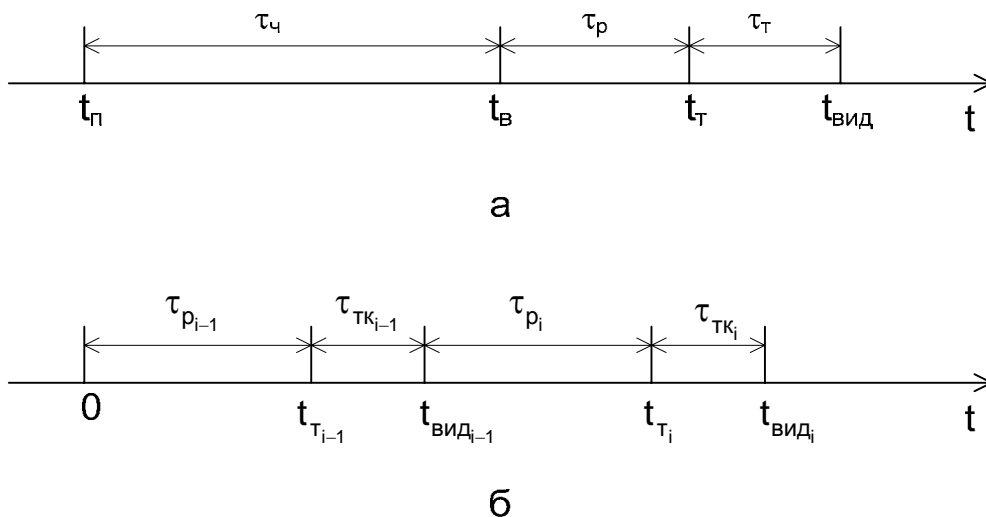


Рис. 8.3. Часові діаграми варіантів тестового контролю

Оперативне здійснення тестового контролю (рис. 8.3, б) можливе під час функціонування об'єкта або його призупинення, необхідного для

визначення достовірності інформації шляхом тестування. При такій організації тестового КД доцільно казати про його вплив на достовірність функціонування підситсем КІВ.

Проаналізуємо організацію КД об'єкта КІВ, який функціонує безперервно протягом тривалого часу. У таких системах чергуються інтервали часу τ_p і τ_{TK} (див. рис. 8.2, б).

Припустимо, що i -ті інтервали ($i = 1, N$) є постійними, засоби тестового контролю й діагностування вмикаються лише на період тестування. Відмова об'єкта КІВ і засобів його КД на інтервалі τ_{TK} є неможливою внаслідок малої величини цього інтервалу, тобто $\tau_{TK} \ll \tau_p$.

Після i -го інтервалу роботи й тестового КД за умови, що на попередніх циклах об'єкт функціонував достовірно, значення ймовірностей $P_{пп}(t_{вид_i})$, $P_{пп}(t_{вид_i})$, $P_{пп}(t_{вид_i})$, достовірності функціонування $D_{пп}(t_{вид_i})$ і недостовірності функціонування $1 - D_{пп}(t_{вид_i})$ при найпростішому потоці відмов можна оцінити з таких виразів:

$$P_{ПП}(t_{вид_i}) = e^{-\lambda_{o.p}(t_{вид_{i-1}} + \tau_p) - \lambda_p^{пероб} \tau_{TK}}; \quad (8.28)$$

$$P_{НН}(t_{вид_i}) = \left[1 - e^{-\lambda_{o.p}(t_{вид_{i-1}} + \tau_p)} \right] L_{П} P_{виявл} e^{-\lambda_p^{пероб} \tau_{TK}}; \quad (8.29)$$

$$P_{НП}(t_{вид_i}) = \left[1 - e^{-\lambda_{o.p}(t_{вид_{i-1}} + \tau_p)} \right] \left(1 - L_{П} P_{виявл} e^{-\lambda_p^{пероб} \tau_{TK}} \right); \quad (8.30)$$

$$P_{ПН}(t_{вид_i}) = e^{-\lambda_{o.p}(t_{вид_{i-1}} + \tau_p) - \lambda_p^{пероб} \tau_{TK}} \left(1 - e^{-\lambda_p^{пероб} \tau_{TK}} \right); \quad (8.31)$$

$$D_T(t_{вид_i}) = e^{-\lambda_{o.p}(t_{вид_{i-1}} + \tau_p) - \lambda_p^{пероб} \tau_{TK}} + \left[1 - e^{-\lambda_{o.p}(t_{вид_{i-1}} + \tau_p)} \right] L_{П} P_{виявл} e^{-\lambda_p^{пероб} \tau_{TK}}; \quad (8.32)$$

$$\bar{D}_T(t_{вид_i}) = 1 - e^{-\lambda_{o.p}(t_{вид_{i-1}} + \tau_p) - \lambda_p^{пероб} \tau_{TK}} + \left[1 - e^{-\lambda_{o.p}(t_{вид_{i-1}} + \tau_p)} \right] L_{П} P_{виявл} e^{-\lambda_p^{пероб} \tau_{TK}}, \quad (8.33)$$

де $P_{виявл}$ — імовірність виявлення відмови засобами тестового контролю;

L_n – повнота тестового контролю об'єкта, який функціонує безперервно протягом тривалого часу;

$\Lambda_{o,p}$ – інтенсивність відмов підконтрольної частини обладнання;

$\lambda_p^{перем}$ – інтенсивність відмов засобів тестового контролю;

$t_{вид_{i-1}}$ – момент часу видачі контрольного результату після попереднього циклу тестового контролю;

T_{TK} – тривалість тестового контролю пристрою;

T_p – тривалість функціонування підконтрольного пристрою між сусідніми тестуваннями.

Ці формули справджуються за таких обставин:

– об'єкт перебував у ввімкненому стані протягом певного інтервалу часу $(0, t_{вид_{i-1}})$;

– причини порушень функціонування об'єкта на інтервалі $(0, t_{вид_{i-1}})$ миттєво усуваються;

– об'єкт виконував завдання протягом часу T_p і тестувався протягом часу T_{TK} .

Процес усунення наслідків відмов об'єктів КД і засобів тестового КД зазвичай пов'язаний із суттєвими часовими втратами. Тому для оцінювання готовності об'єктів КІВ під час застосування за призначенням потрібно враховувати параметри процесу відновлення.

Контрольні запитання

1. Перелічіть властивості пристосованості об'єктів до контролю й діагностування.
2. Наведіть одиничні показники ефективності систем контролю й діагностування
3. Дайте означення повноти контролю й діагностування.
4. Дайте означення глибини контролю й діагностування
5. Дайте означення оперативності контролю й діагностування.
6. Назвіть складові безвідмовності засобів контролю й діагностування.
7. Назвіть способи оцінювання складності засобів контролю й діагностування.
8. Назвіть складові достовірності функціонування систем робочого контролю й діагностування.
9. У яких випадках є правильними вирази (8.28) – (8.33)?
10. Оцініть достовірність функціонування об'єкта КІВ з тестовим контролем і діагностуванням, який функціонує безперервно протягом тривалого часу.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Благодарний, М.П. Інформаційні та виконавчі мікромашини мехатронних комплексів транспортних засобів [Текст] : консп. лекцій / М.П. Благодарний, О.П. Алексієв. — Х. : ХНАДУ, 2006. — 150 с.
2. Благодарний, М.П. Основи побудови цифрових систем мехатронних комплексів автотранспортних засобів [Текст] : консп. лекцій / М.П. Благодарний, О.П. Алексієв, Г.М. Тимонькін. — Х. : ХНАДУ, 2005. — 116 с.
3. Джексон, Р.Г. Новейшие датчики [Текст] : справочник / Р.Г. Джексон. — 2-е изд., доп. — М. : Техносфера, 2008. — 400 с.
4. Литвиненко, В.В. Автомобильные датчики, реле и переключатели [Текст] : краткий справ. / В.В. Литвиненко, А.П. Майструк. — М. : ЗАО КЖИ «За рулем», 2004. — 176 с.
5. Благодарний, М.П. Основи цифрових систем [Текст] : підруч. / М.П. Благодарний, В.С. Харченко. — Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», 2002. — 672 с.
6. Подлесный, Н.И. Элементы систем автоматического управления и контроля [Текст] : учеб. пособие / Н.И. Подлесный, В.Г. Рубанов. — К. : Вища шк., 1992. — 473 с.
7. Фрайден, Дж. Современные датчики [Текст] : справочник / Дж. Фрайден. — М. : Техносфера, 2005. — 592 с.
8. Ямаке, Я. Датчики и микро-ЭВМ [Текст] / Я. Ямаке, Н. Како. — Л. : Энергоатомиздат, 1986. — 120 с.
9. Пальчевський, Б.О. Автоматизація технологічних процесів (виготовлення та пакування виробів) [Текст] : навч. посіб. / Б.О. Пальчевський. — Л. : Світ, 2007. — 392 с.
10. Основи діагностики цифрових систем [Текст] : підручник / В.С. Харченко, Є.А. Артеменко, М.П. Благодарний, В.М. Ілюшко. — Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», 2004. — 665 с.
11. Якобсон, Б.М. Автоматизированные системы управления производством [Текст] : учеб. пособие / В.М. Якобсон, А.Е. Розинкин. — М. : Сов. радио, 1971. — 224 с.
12. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики [Текст] : учеб. пособие / В.В. Сапожников, Вл.В. Сапожников, Х.А. Христов, Д.В. Гавзов. — М. : Транспорт, 1995. — 272 с.
13. Контроль функционирования больших систем [Текст] : монография / Г.П. Шибанов, Е.А. Артеменко, А.А. Метешкин, Н.И. Циклинский. — М. : Машиностроение, 1977. — 360 с.
14. Артеменко, Е.А. Основы теории и прохождения сигналов и ее приложение к телемеханике [Текст] : учебник / С.Н. Терентьев, Е.А. Артеменко, В.А. Кедрус. — М. : МО СССР, 1975. — 447 с.
15. Харченко, В.С. Основы построения и проектирования АСУ техническим состоянием летательных комплексов [Текст] : учеб. пособие:

в 2 ч. / В.С. Харченко, Г.Н. Тимонькин, В.А. Сычев. — М. : МО СССР, 1990. — Ч. 1: Основы теории надежности и методы управления техническим состоянием систем летательных комплексов. — 265 с.

16. Артеменко, Е.А. Основы построения систем контроля и управления сложными техническими объектами [Текст] : учебник / Е.А. Артеменко. — М. : МО СССР, 1985. — 303 с.

17. Методы и средства повышения надежности микропрограммных управляющих автоматов [Текст] : учеб. пособие / Г.Н. Тимонькин, В.С. Харченко, Н.П. Благодарный, М.П. Ткачев. — М. : МО СССР, 1989. — 311 с.

18. Горяшко, А.П. Синтез диагностируемых схем вычислительных устройств [Текст] : учеб. пособие / А.П. Горяшко. — М. : Наука, 1987. — 288 с.

19. Беннетс, Р. Проектирование тестопригодных логических схем [Текст] : учеб. пособие / Р. Беннетс. — М. : Радио и связь, 1990. — 176 с.

20. Волков, Л.И. Управление эксплуатацией летательных комплексов [Текст] : учебник / Л.И. Волков. — М. : Высш. шк., 1981. — 278 с.

21. Журавлев, Ю.П. Надежность и контроль ЭВМ [Текст] : монография / Ю.П. Журавлев, Л.А. Котелюк, Н.И. Циклинский. — М. : Сов. радио, 1978. — 416 с.

22. Архангельский, Б.В. Поиск устойчивых ошибок в программах [Текст] : учеб. пособие / Б.В. Архангельский, В.В. Черняховский. — М. : Радио и связь, 1989. — 240 с.

23. Майерс, Г. Искусство тестирования программ [Текст] : монография / Г. Майерс. — М. : Финансы и статистика, 1982. — 176 с.

24. Пархоменко, П.П. Основы технической диагностики [Текст] : монография : в 2 кн. / П.П. Пархоменко, Е.С. Согомонян. — М. : Энергия, 1976. — Кн. 1 : Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза. — 464 с.

25. Долгов, В.А. Радиоэлектронные автоматические системы контроля [Текст] : монография / В.А. Долгов, А.С. Касаткин, В.Н. Сретенский. — 1978. — 384 с.

26. Надежность технических систем [Текст] : справочник / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и др. ; под ред. И.А. Ушакова. — М. : Радио и связь, 1985. — 608 с.

27. Благодарный, М.П. Системи оброблення сигналів у комп'ютерно-інтегрованих виробництвах [Текст] : навч. посіб. / М.П. Благодарный, І.П. Внуков, З.Т. Лукашева. — Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», 2010. — 136 с.

28. Жураковский, Ю.П. Передача информации в ГАП [Текст] : учеб. пособие / Ю.П. Жураковский. — К. : Вища шк., 1991. — 216 с.

Зміст

Вступ.....	3
Частина 1. ПРИСТРОЇ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ	5
1. Комп'ютерно-інтегровані виробництва та їхні характеристики..	5
1.1. Узагальнена структура комп'ютерно-інтегрованого виробництва.....	5
1.2. Загальні відомості про технологічні процеси.....	10
1.3. Приклади автоматизованих систем контролю технологічних процесів.....	17
1.4. Основні характеристики комп'ютерно-інтегрованих виробництв.....	21
1.5. Керування якістю технологічних процесів.....	25
2. Засоби контролю технологічних процесів.....	36
2.1. Класифікація датчиків.....	37
2.2. Потенціометричні датчики.....	44
2.3. Індуктивні, трансформаторні і ємнісні датчики.....	48
2.4. Датчики швидкостей і прискорень.....	58
2.5. Датчики температури.....	65
2.6. Датчики сили, механічної напруги і дотику.....	70
2.7. Датчики тиску.....	74
2.8. Датчики вологості і вмісту води.....	77
2.9. Хімічні датчики.....	79
2.10. Датчики аварійних режимів.....	83
3. Засоби і методи збору первинної інформації.....	84
3.1. Перетворювачі кодів.....	84
3.2. Мультиплексори.....	87
3.3. Порівнювальні пристрої.....	89
3.4. Мажоритарні елементи.....	91
3.5. Засоби формування первинної інформації.....	92
3.6. Засоби перетворення первинної інформації.....	93
3.7. Методи збору первинної інформації від датчиків з неперервними вихідними сигналами.....	96
3.8. Методи збору первинної інформації від дискретних датчиків і пристроїв уведення.....	100
3.9. Методи і засоби видачі керувальних дій	105
Частина 2. МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ....	110
4. Основні поняття контролю і технічної діагностики.....	110
4.1. Місце контролю у функціонуванні комп'ютерно-інтегрованих виробництв.....	110
4.2. Поняття технічного стану об'єкта.....	114
4.3. Класифікація видів і методів контролю.....	118
4.4. Методи контролю функціонування підсистем комп'ютерно-інтегрованих виробництв.....	122

4.5.	Класифікація процесів контролю і діагностування.....	126
4.6.	Засоби й алгоритми контролю і діагностування.....	129
5.	Методи контролю аналогових вузлів комп'ютерно-інтегрованих виробництв.....	131
5.1.	Особливості аналогових вузлів як об'єктів контролю.....	131
5.2.	Частотні методи контролю.....	132
5.3.	Часові методи контролю.....	134
5.4.	Інтегральні методи контролю.....	136
6.	Методи контролю цифрових вузлів комп'ютерно-інтегрованих виробництв.....	138
6.1.	Загальні відомості.....	138
6.2.	Моделі відмов дискретних елементів.....	140
6.3.	Методи апаратного контролю.....	142
6.4.	Методи програмного контролю.....	147
7.	Системи контролю і діагностування комп'ютерно-інтегрованих виробництв.....	150
7.1.	Системи робочого контролю і діагностування.....	150
7.2.	Системи тестового контролю і діагностування.....	151
7.3.	Структурні схеми узагальнених систем контролю і діагностування.....	153
7.4.	Особливості елементів комп'ютерно-інтегрованих виробництв як об'єктів контролю і діагностування.....	155
7.5.	Принципи організації контролю і діагностування комп'ютерно-інтегрованих виробництв.....	156
8.	Показники ефективності систем контролю і діагностування.....	160
8.1.	Показники пристосованості об'єктів до контролю і діагностування.....	160
8.2.	Одиничні показники ефективності систем контролю і діагностування.....	162
8.2.1.	Повнота контролю і діагностування.....	162
8.2.2.	Глибина контролю і діагностування.. ..	164
8.2.3.	Оперативність контролю і діагностування.....	165
8.2.4.	Безвідмовність засобів контролю і діагностування	166
8.2.5.	Складність засобів контролю і діагностування.....	166
8.3.	Достовірність функціонування систем робочого контролю і діагностування.....	167
8.4.	Достовірність функціонування систем тестового контролю і діагностування.....	173
	Бібліографічний список.....	176

Навчальне видання

**Благодарний Микола Петрович
Внуков Ігор Павлович
Тимонькін Григорій Миколайович**

ПРИСТРОЇ І МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Редактор О.Ф. Серьожкіна

Зв. план, 2013

Підписано до друку 23.10.2013

Формат 60×84 1/16. Папір офс. № 2. Офс. друк

Ум. друк. арк. 10. Обл.-вид. арк. 11,25. Наклад 100 пр.

Замовлення 298. Ціна вільна

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