

ЛЕКЦІЯ 1. ЗАГАЛЬНА СТРУКТУРА ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Технічні засоби автоматизації (ТЗА) є матеріальною та функціональною основою побудови автоматизованих систем керування (АСК) і визначають їх технічний рівень, надійність, точність та ефективність. Під технічними засобами автоматизації розуміють сукупність пристроїв, апаратів, елементів і систем, що забезпечують отримання, перетворення, передавання, обробку, зберігання інформації, формування керуючих впливів та їх реалізацію на об'єкті керування. Рациональна побудова та класифікація ТЗА мають принципове значення для проектування, експлуатації й модернізації автоматизованих систем різного призначення.

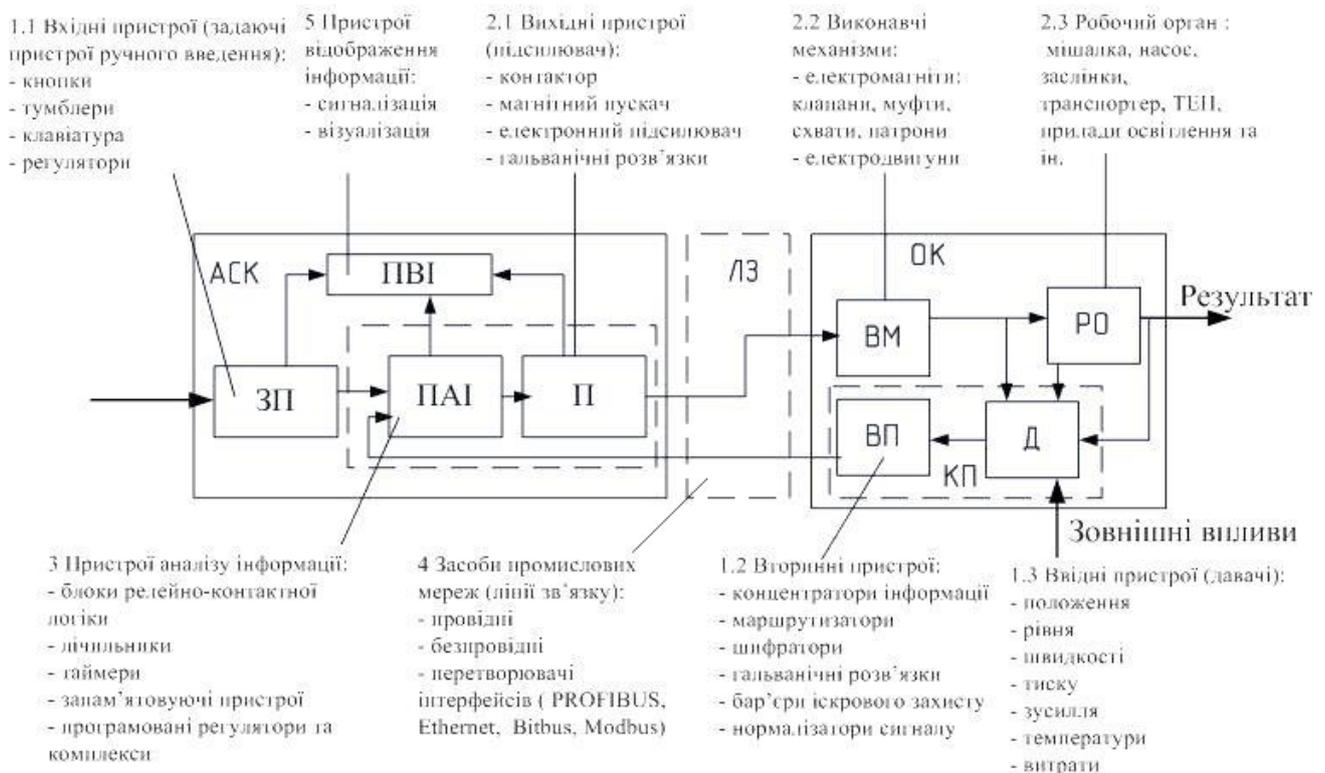


Рис. 1.1 - Функціональна класифікація ТЗА в структурі АСК

Узагальнена структура автоматизованої системи керування електротехнічними комплексами наведена на рис. 1.1. Відповідно до цієї структурної схеми АСК складається з об'єкта керування (ОК), датчиків (Д), ліній зв'язку (ЛЗ), пристроїв аналізу інформації (ПАІ), підсилювачів (П), задавальних пристроїв (ЗП), вторинних пристроїв (ВП), пристроїв відображення інформації (ПВІ), виконавчих механізмів (ВМ), робочих органів (РО) та контрольних пристроїв (КП). Функціонування системи здійснюється за замкненим циклом: інформація про стан об'єкта знімається датчиками, перетворюється у форму, придатну для передавання, аналізується й обробляється, після чого формується керуючий вплив, що через виконавчі механізми змінює стан робочих органів об'єкта. Структурна схема, подана на

рисунку 1.1, відображає послідовність перетворення інформації та енергії в процесі автоматичного керування.

Різноманіття автоматичних систем зумовлює значну номенклатуру елементів, що входять до їх складу. У зв'язку з цим виникає необхідність науково обґрунтованої класифікації ТЗА. Довільний вибір ознак класифікації може призвести до дублювання функцій, надмірної різноманітності конструкцій та ускладнення експлуатації. Тому в основу класифікаційної схеми доцільно покласти функціональні ознаки, що відображають роль елементів у загальному процесі керування. Класифікаційні ознаки елементів автоматики наведено на рис. 1.2. Відповідно до них елементи поділяються на елементи інформації, порівняння, розподілу, підсилення, обчислення, пам'яті, логіки, виконання та допоміжні елементи.



Рис. 1.2 - Класифікаційні ознаки елементів автоматики

Елементи інформації призначені для отримання первинних відомостей про параметри об'єкта керування. До них належать датчики або вимірювальні перетворювачі. Датчик є пристроєм, що перетворює фізичну величину, яка надходить на його вхід, у вихідний сигнал іншої фізичної природи, більш зручний для подальшої обробки. Основною характеристикою датчика є функціональна залежність вихідної величини від вхідної, яка у загальному вигляді описується співвідношенням $y = f(x)$. За принципом дії датчики поділяються на параметричні та генераторні. Параметричні (пасивні) датчики змінюють один із параметрів електричного кола — активний опір, індуктивність або ємність — під впливом контрольованої величини і потребують зовнішнього джерела живлення. Генераторні (активні) датчики формують електрорушійну силу безпосередньо за рахунок енергії вимірюваної величини (термоелектричні, п'єзоелектричні, фотоелектричні тощо). За характером вимірюваної

величини датчики поділяються на механічні, теплові, електричні, магнітні, оптичні, хімічні та інші. Часто застосовуються комбіновані датчики з проміжним перетворенням, у яких первинний перетворювач формує механічне переміщення, що надалі трансформується в електричний сигнал.

Елементи порівняння забезпечують визначення відхилення між заданим і поточним значеннями регульованого параметра. Результатом їх роботи є сигнал похибки, який надходить до регулятора або підсилювального пристрою. Елементи підсилення призначені для збільшення потужності сигналу до рівня, необхідного для керування виконавчими механізмами. За принципом дії підсилювачі поділяються на електронні, напівпровідникові, магнітні, електромашинні, пневматичні та гідравлічні. За функціональним призначенням розрізняють підсилювачі струму, напруги й потужності як постійного, так і змінного струму.

Елементи обчислення реалізують математичні операції, необхідні для формування закону керування: додавання, віднімання, множення, ділення, інтегрування, диференціювання, логарифмування, виконання тригонометричних функцій тощо. У сучасних системах ці функції, як правило, реалізуються програмно за допомогою мікропроцесорних засобів. Елементи пам'яті призначені для збереження програм, опорних сигналів, часових функцій і параметрів процесу. Логічні елементи реалізують операції булевої алгебри й забезпечують побудову алгоритмів дискретного керування.

Виконавчі елементи є завершальною ланкою системи та забезпечують перетворення електричних сигналів у механічну дію. До них належать електромагніти з утяжними або поворотними якорями, електромагнітні муфти та електродвигуни. Електромагніти застосовуються для переміщення клапанів, вентилів, золотників та інших робочих органів. Електромагнітні муфти використовуються для швидкого вмикання, вимикання або реверсування механізмів, а також для регулювання швидкості та обмеження передаваного моменту. Електродвигуни є найпоширенішими виконавчими елементами і забезпечують перетворення електричної енергії на механічну з можливістю регулювання швидкості, реверсу та розвитку необхідної потужності.

Розвиток технічних засобів автоматизації відбувався еволюційно, що відображено на рис. 1.3. Початковий етап характеризувався використанням релейно-контактних схем, які відзначалися простотою, але мали обмежену надійність і швидкодію. Подальший розвиток пов'язаний із переходом до напівпровідникових елементів, а згодом — до інтегральних мікросхем високого ступеня інтеграції. Сучасний етап характеризується впровадженням мікропроцесорних систем, програмованих логічних контролерів та гнучких програмно-конфігурованих структур. Основними тенденціями розвитку ТЗА є розширення функціональних можливостей (керування, сигналізація, діагностика, зв'язок), ускладнення

елементної бази, перехід до перепрограмованих структур і застосування систем автоматизованого проектування.

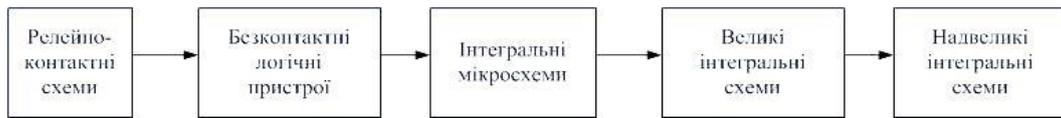


Рис. 1.3 - Еволюція елементної бази електричних засобів автоматизації

Побудова сучасних ТЗА базується на принципах типізації, уніфікації та агрегування. Типізація передбачає зведення різноманіття конструкцій до обмеженої кількості раціональних типів із визначеними параметрами. Уніфікація спрямована на скорочення номенклатури виробів шляхом встановлення єдиних типорозмірів, параметрів і конструктивних рішень. Агрегування полягає у створенні складних систем із обмеженої кількості уніфікованих модулів і блоків, що забезпечує гнучкість, взаємозамінність і спрощення технічного обслуговування.

Важливою характеристикою елементів автоматики є їх поведінка в динамічному режимі. Динамічний режим роботи розглядається як процес переходу елемента або системи з одного усталеного стану в інший при зміні входньої величини. Перехідні процеси при стрибкоподібній зміні входнього сигналу наведені на рис. 1.4.

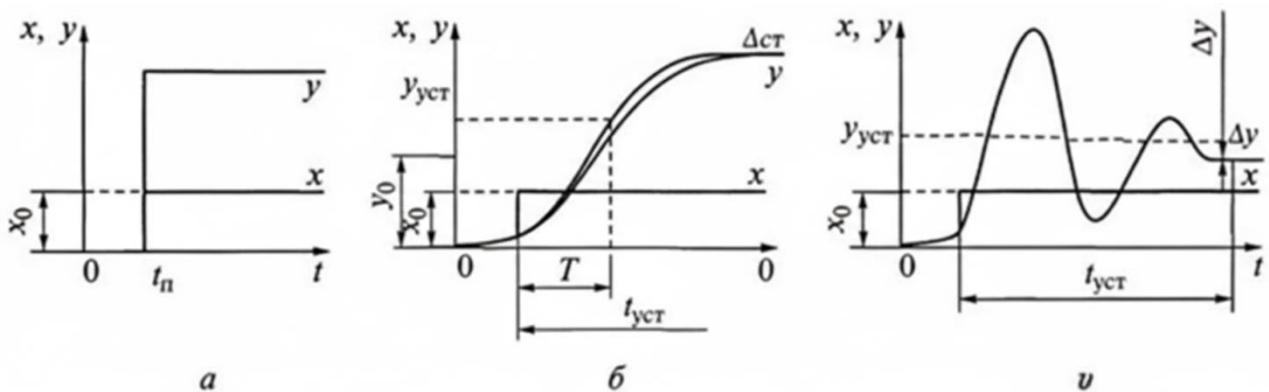


Рис. 1.4 - Види перехідних процесів у ланках АСК залежно від їх інерційних властивостей

За відсутності інерційності вихідна величина змінюється миттєво (рис. 1.4, а). За наявності інерційності спостерігається запізнювання реакції та перехідний процес, який може бути аперіодичним загасаючим (рис. 1.4, б) або коливальним загасаючим (рис. 1.4, в). У найпростішому випадку процес встановлення описується експоненціальною залежністю))

$$y = y_0(1 - e^{-t/T}) \quad (1.1)$$

де T — постійна часу елемента. Час встановлення зазвичай становить $(3-5)T$ і визначається допустимою динамічною похибкою. Інерційність може бути зумовлена механічними, електромагнітними або тепловими процесами й впливає на стійкість системи.

Загальна структура та класифікація технічних засобів автоматизації визначають логіку побудови автоматизованих систем керування. Функціональна класифікація дозволяє впорядкувати різноманіття елементів, забезпечити їх взаємодію та оптимізувати процес проєктування. Сучасні ТЗА характеризуються високим рівнем інтеграції, модульністю, гнучкістю та програмною адаптивністю, що забезпечує ефективне керування складними технологічними процесами в різних галузях техніки.

ЛЕКЦІЯ 2. ПЕРВИННІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТА ДАТЧИКИ

Функціонування систем автоматичного керування та автоматизованих вимірювальних комплексів ґрунтується на безперервному надходженні інформації про стан об'єкта, параметри середовища та реакцію на керуючі дії. Джерелом такої інформації є вимірювальні перетворювачі. У практиці автоматики використовують також терміни «первинний перетворювач» і «датчик»: перший доцільно вживати під час розгляду принципу дії (фізичного явища перетворення), тоді як другий – під час опису конструкції, монтажу та взаємодії з вимірювальною системою. У загальному вигляді перетворювач реалізує відображення $x \rightarrow u$, де вхідна величина x (температура, тиск, переміщення, концентрація тощо) перетворюється на вихідну величину u , придатну для передавання та оброблення.

Номенклатура контрольованих величин є надзвичайно широкою; тому в ДСП їх групують за природою та сферою застосування. Виокремлюють теплоенергетичні, електроенергетичні, механічні, хіміко-аналітичні параметри та фізичні властивості середовищ. Данна класифікація підкреслює, що первинні перетворювачі працюють на межі різних фізичних доменів, забезпечуючи «переклад» неелектричних впливів у сигнал, зручний для електронної або цифрової обробки.

За структурою вимірювального каналу перетворювачі можуть поєднуватися в типові схеми (рис. 2.1): прямого однократного перетворення, послідовного прямого перетворення, диференціальну та компенсаційну (зі зворотним зв'язком).



Рис. 2.1 – Класифікація ВП

Однократна схема характерна для багатьох первинних перетворювачів із природним виходом, коли властивості каналу визначаються параметрами чутливого елемента. Послідовне з'єднання застосовують, коли однієї ланки недостатньо для отримання потрібного формату

сигналу (наприклад, при формуванні уніфікованого виходу або корекції характеристики). При цьому сумарний коефіцієнт перетворення зростає як добуток коефіцієнтів ланок, а сумарна похибка – як сума їхніх внесків, що потребує оптимізації структури. У диференціальних схемах порівняння двох каналів зменшує вплив збурень і адитивних складових похибки, а компенсаційні схеми забезпечують високу точність завдяки автоматичному зрівноважуванню та слабкій залежності коефіцієнта перетворення від зовнішніх факторів. У послідовному вимірювальному колі виділяють первинний перетворювач і проміжні перетворювачі (рис. 2.2), які виконують підсилення, лінеаризацію, фільтрацію, перетворення роду сигналу.

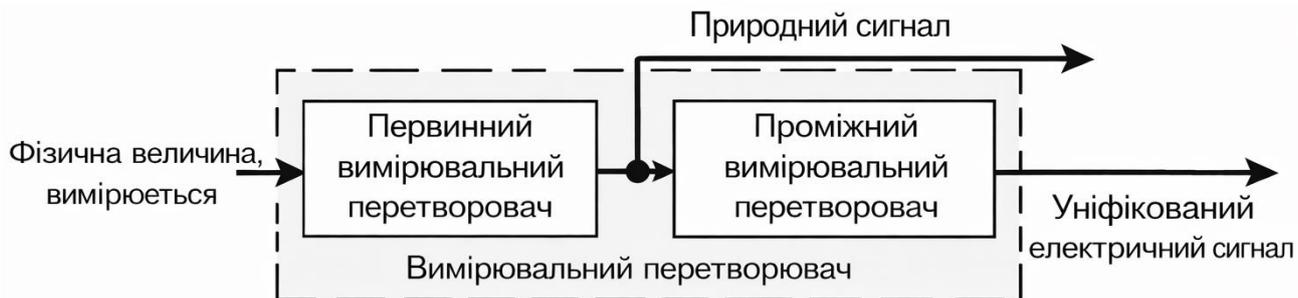


Рис. 2.2 - Схема поетапного перетворення вимірюваної величини в уніфікований сигнал

За видом вихідного сигналу розрізняють перетворювачі з природним та уніфікованим виходом. Природний сигнал формується «вбудовано» методом перетворення і може мати вигляд напруги термопари, зміни опору терморезистора, деформаційної зміни опору тензодатчика, частоти, ємності тощо. Уніфікований сигнал визначається фіксованим фізичним форматом і межами зміни незалежно від виду вимірюваної величини; такі виходи забезпечують інформаційну сумісність елементів складних систем і зручні для передавання на великі відстані. Окрему групу становлять перетворювачі з дискретним (релейним) виходом, що застосовуються в сигналізації та позиційному регулюванні.

Метрологічні властивості описують статичні та динамічні характеристики. Статична характеристика – це залежність $y = f(x)$ в усталеному режимі; типові форми (лінійна, нелінійна, із зоною нечутливості, насиченням, релейна, з гістерезисом) показано на рисунку 2.3. Для лінійного перетворювача зручно використовувати модель $y = B + K \cdot x$, де K є чутливістю, а B – зсувом. Для нелінійних характеристик чутливість змінюється з робочою точкою і визначається диференціальним коефіцієнтом $K_d = dy/dx$. Робочий діапазон та динамічний діапазон характеризують область коректного застосування, тоді як похибки поділяють на основні (за нормальних умов) і додаткові (через температуру, вологість, нестабільність живлення, механічні впливи, старіння). Динамічні властивості проявляються при змінних у часі впливах і описуються запізненням, фазовим зсувом та обмеженням частотного діапазону; це важливо для замкнених систем керування.

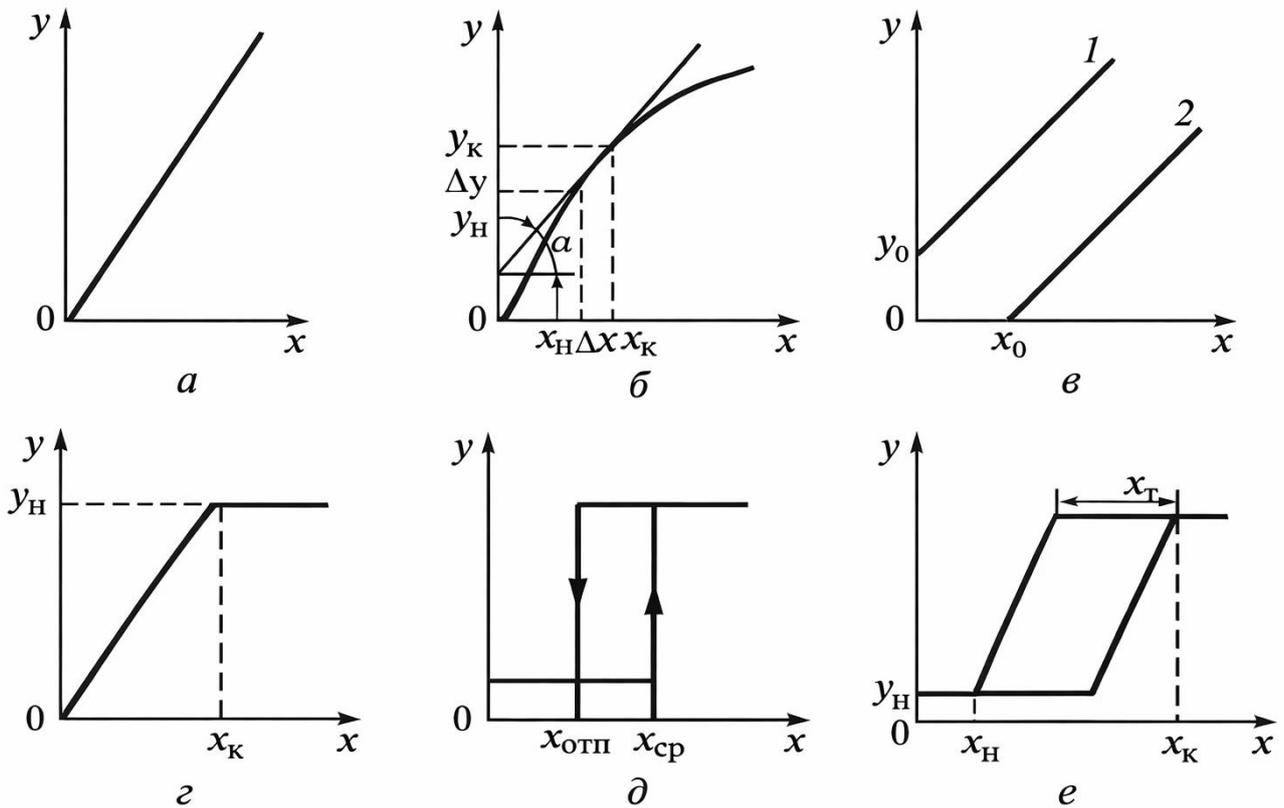


Рисунок 2.3 – Статистичні характеристики ВП: а – лінійна; б – нелінійна; в – з холостим ходом та зоною нечутливості; г – з ділянкою насичення; д – релейний вид; е – з петлею гістерезису

Датчик як елемент вимірювальної системи доцільно визначати як пристрій, що перетворює зовнішній вплив у електричний сигнал, доступний для підключення провідниками. Датчик може бути складеним і включати кілька перетворювачів різної фізичної природи (рис. 2.4), однак у структурі зазвичай присутній щонайменше один датчик прямої дії, який реалізує безпосереднє перетворення енергії впливу в електричний вихід.



Рис. 2.4 - Схема багатоступеневого перетворення зовнішнього впливу в електричний сигнал

Роль датчиків у системі збору даних і потребу в інтерфейсних перетворювачах добре ілюструє блок-схема автоматизованого вимірювального комплексу (рис. 2.5), де частина датчиків є зовнішніми, а частина – вбудованими.

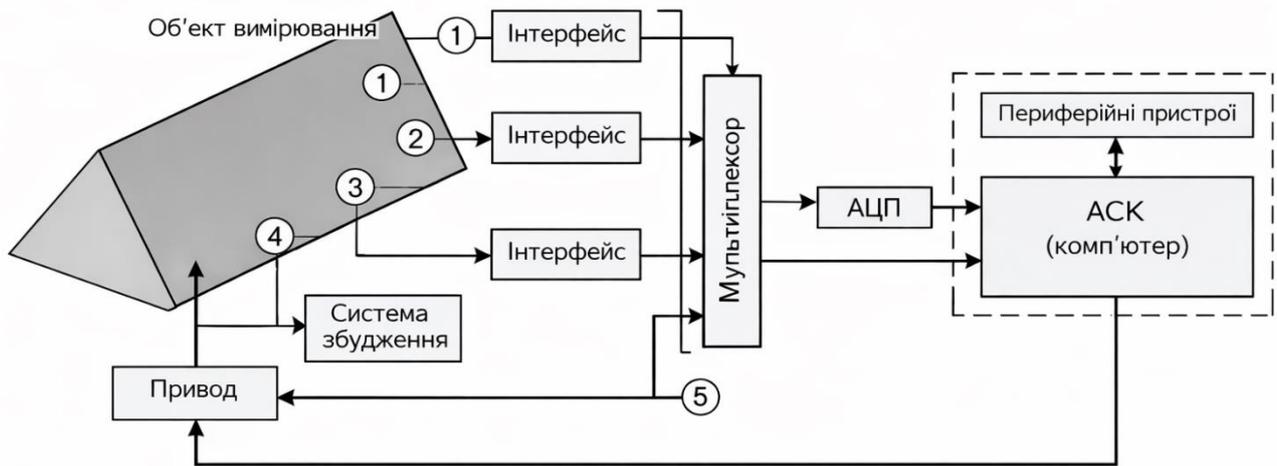


Рис. 2.5 - Автоматизований вимірювальний комплекс, який зображує роль датчиків у системі збору даних

Практично значущою є класифікація на пасивні й активні датчики. Пасивні формують вихідний сигнал без зовнішнього живлення, використовуючи енергію самого впливу (термопари, фотодіоди, п'єзоелементи). Активні потребують сигналу збудження і змінюють його параметри у відповідь на вплив; тому їх часто називають параметричними (термістори, резистивні тензодатчики). Додатково датчики поділяють на абсолютні й відносні: абсолютні відтворюють величину в абсолютних одиницях (наприклад, залежність опору термістора від температури), тоді як відносні вимагають базової точки відліку (термопара, відносний датчик тиску). Узагальнені підходи до класифікації за характеристиками, матеріалами, механізмами перетворення та видами зовнішніх впливів наведено у таблицях 2.1–2.5.

Таблиця 2.1

Технічні та експлуатаційні характеристики сенсорних пристроїв

Категорія параметрів	Перелік характеристик
Метрологічні	Чутливість, точність, лінійність передатної функції, гістерезис, роздільна здатність (дозволяюча здатність), поріг чутливості («мертва зона»).
Динамічні	Швидкодія, динамічна похибка, час встановлення сигналу, частотний діапазон.
Електричні	Тип та форма вихідного сигналу, вихідний імпеданс, напруга збудження, рівень насичення.
Надійність та ресурс	Стабільність (коротко- та довгострокова), експлуатаційний ресурс, відмова на відмову, стійкість до перевантажень.
Конструктивні	Габаритні розміри, маса, кінематичні зв'язки (важелі), тип монтажу.
Експлуатаційні	Кліматичне виконання (оточуюче середовище), умови використання, вибірковість (селективність).

Таблиця 2.2

Класифікація матеріалів чутливих елементів

Стан та структура речовини	Типи використовуваних матеріалів
Твердофазні	Неорганічні та органічні сполуки, провідники, діелектрики, напівпровідники.
Рідкі та газоподібні	Технічні рідини, електроліти, гази, плазмові середовища.
Специфічні	Біологічні тканини, композитні матеріали та полімери.

Таблиця 2.3

Фізико-хімічні засоби детектування сигналів

Напрямок детектування	Об'єкти та явища, що реєструються
Енергетичні	Теплові поля (температура), радіоактивне випромінювання, світлове випромінювання.
Електромагнітні	Електричні величини, магнітна індукція, електромагнітні хвилі.
Просторово-механічні	Переміщення, механічні коливання (вібрація), геометричні параметри.
Речовинні	Хімічний склад середовища, біологічна активність.

Таблиця 2.4

Класифікація механізмів перетворення енергії

Тип процесу	Ефекти та явища перетворення
Фізичні	Термоелектричні, термопружні, фотоелектричні, електромагнітні, п'єзоелектричні (електропружність), фотооптичні.
Хімічні	Електрохімічні реакції, хімічні перетворення складних сполук, аналітична спектроскопія.
Біологічні	Біохімічні перетворення, зміна стану об'єкта тестування, біоспектроскопія.

Таблиця 2.5

Види зовнішніх впливів на первинні перетворювачі

Вид впливу	Параметри, що підлягають вимірюванню
Механічний	Координати, прискорення, сила, тиск, момент, витрата маси, шорсткість поверхні.
Електричний	Потенціал, напруга, струм, заряд, діелектрична проникність, провідність.
Магнітний	Напруженість поля, магнітна індукція (амплітуда, фаза, спектр).
Оптичний	Інтенсивність світла, спектральний склад, поляризація, коефіцієнт поглинання.
Тепловий	Температурний градієнт, теплоємність, теплопровідність, тепловий потік.
Хіміко-біологічний	Концентрація елементів, склад біомаси, в'язкість середовища, радіаційна енергія.

Кількісний опис датчика ґрунтується на передатній функції $S = f(s)$, яка встановлює зв'язок між зовнішнім впливом s і вихідним параметром S (амплітудою, частотою або фазою). Для лінійної моделі застосовують $S = a + b \cdot s$, де b є чутливістю. У багатьох випадках передатна функція є нелінійною або навіть багатовимірною; прикладом є інфрачервоний датчик, вихід якого залежить як від температури об'єкта, так і від температури сенсорного елемента. Основні експлуатаційні параметри включають діапазон вимірюваних значень (FS), діапазон вихідних значень (FSO), точність і похибки. Процедури калібрування та вплив помилок калібрування пояснюються на рисунку 2.6, а вплив гістерезису, нелінійності, насичення, відтворюваності та мертвої зони – на рисунках 2.7 – 2.9. Електрична сумісність з інтерфейсом визначається вихідним імпедансом і схемою узгодження, а для активних датчиків – параметрами сигналу збудження та можливими похибками саморозігріву.

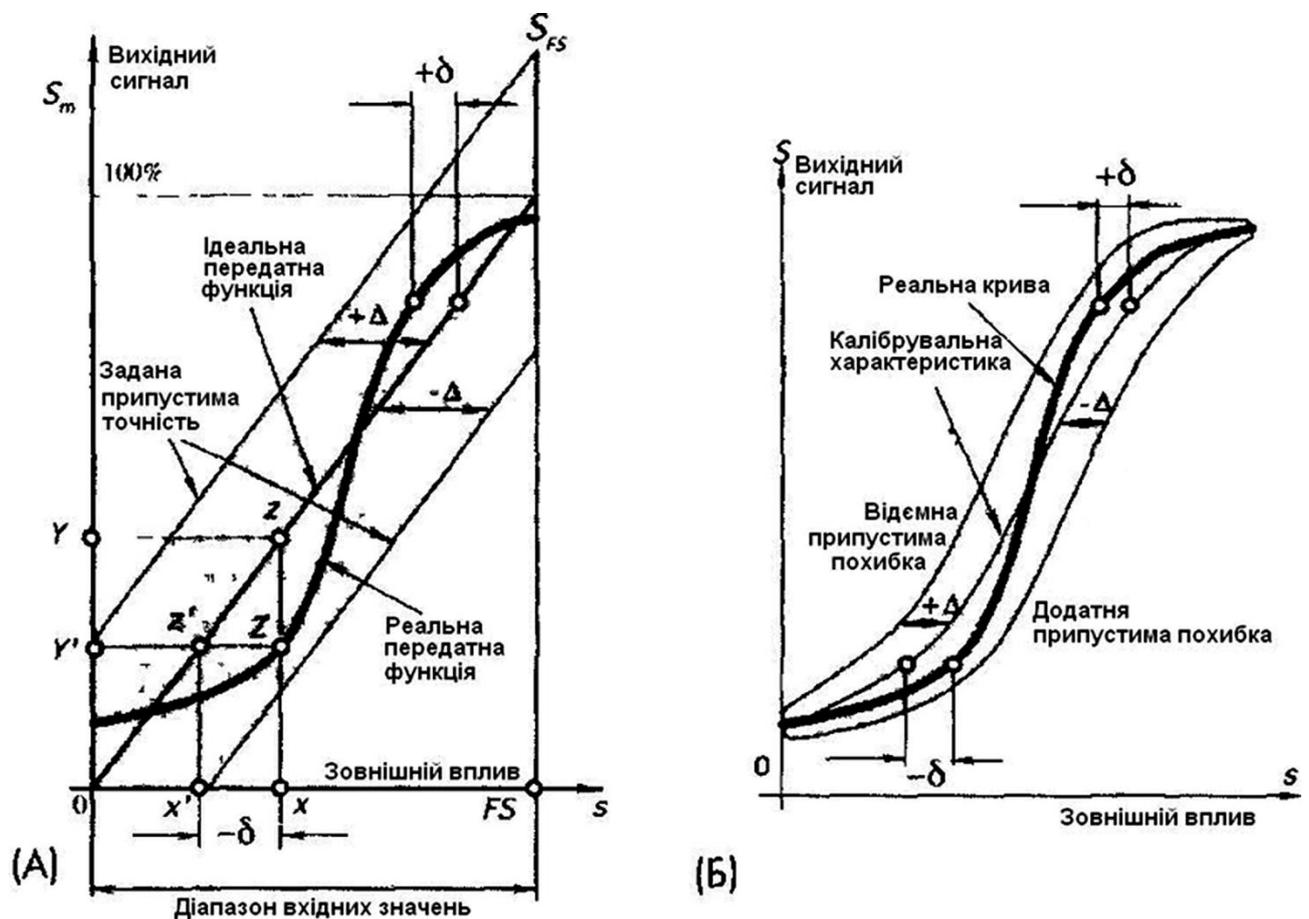


Рис. 2.6 - Передатна функція (а) та межа припустимої похибки (б). Похибки визначаються відносно вхідних значень

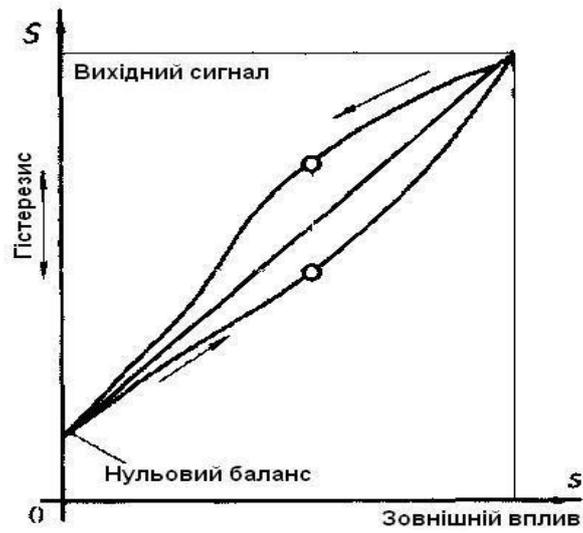


Рис. 2.7 - Передатна функція з гістерезисом

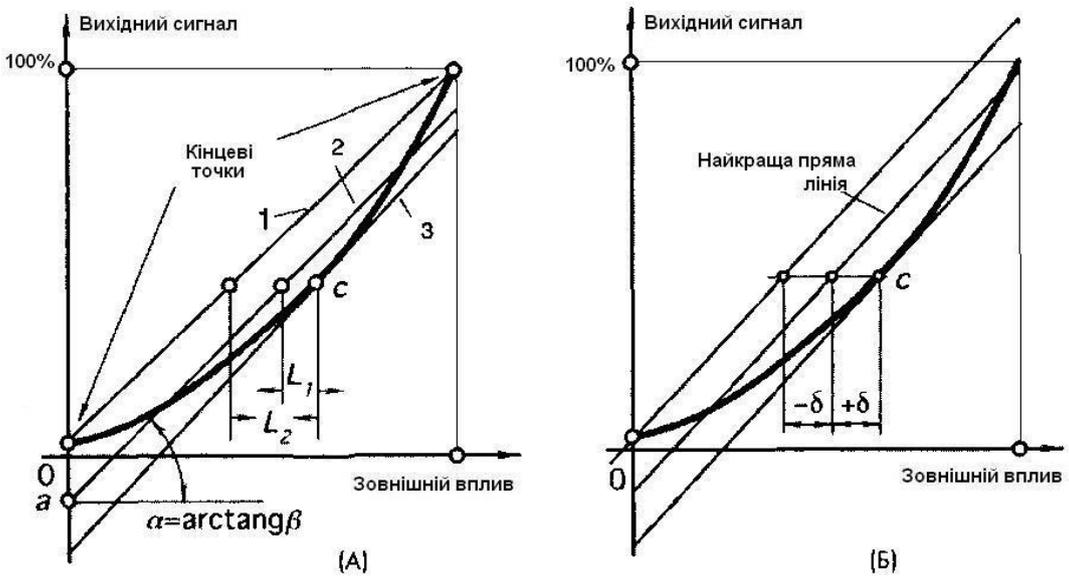


Рис. 2.8 - Лінійна апроксимація нелінійної передатної функції (а) та незалежна лінеаризація (б)

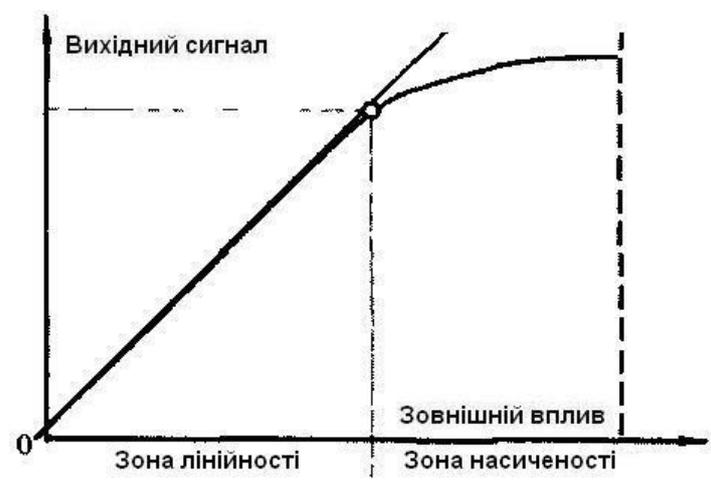


Рис. 2.9 - Передатна функція з насиченням

Динамічні характеристики датчиків пов'язані з наявністю енергонакопичувальних елементів і описуються моделями нульового, першого або другого порядку. Для датчиків першого порядку ключовим параметром є постійна часу, а реакцію зручно характеризувати частотною характеристикою та фазовим зсувом. Для датчиків другого порядку суттєвими стають резонансна частота і демпфірування (рис. 2.10); можливі типові форми вихідних сигналів у відповідь на східчастий вплив. У промислових умовах необхідно враховувати також фактори середовища (температура, вологість, вібрації, ЕМІ), які можуть змінювати передатну функцію, та показники надійності.

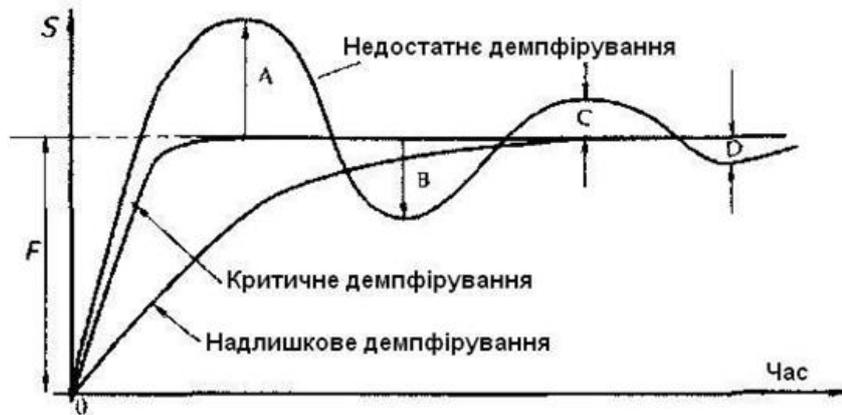


Рис. 2.10 - Вид вихідних сигналів у датчиках з різним коефіцієнтом демпфування

Схеми включення датчиків у системи електроавтоматики визначають практичну завадостійкість і коректність роботи каналу. Типові прямі та інверсні варіанти включення вхідних пристроїв у АСК наведено на рисунку 2.11.

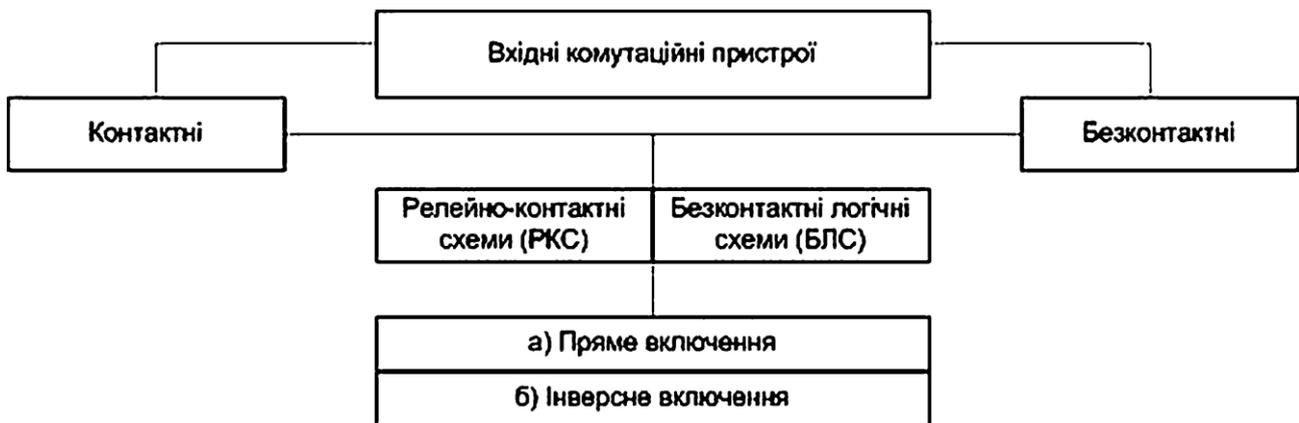


Рис. 2.11 - Схеми включення вхідних пристроїв у АСК

Контактні пристрої підключають у релейно-контактних схемах через послідовні/паралельні з'єднання контактів або, у разі безконтактної логіки, через резистивні схеми узгодження. Для безконтактних датчиків широко застосовують гальванічну розв'язку, зокрема розділові трансформатори та оптронні пари : приклад оптронної розв'язки індуктивного шляхового вимикача з TTL-логікою подано на рисунку 2.12, де RC-ланка може

виконувати протидребезгову фільтрацію, а стабілітрони – формування порогу та захист від перевантажень.

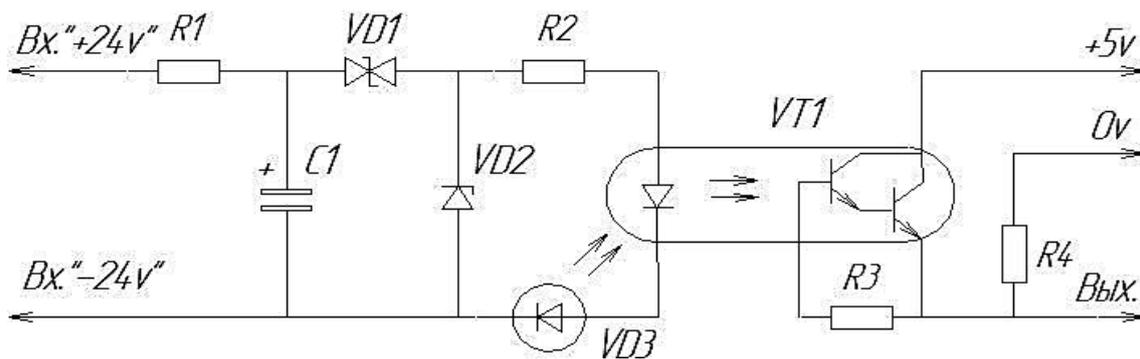


Рис. 2.12 - Схема гальванічної розв'язки на основі оптопар

Первинні вимірювальні перетворювачі та датчики є фундаментом інформаційного каналу будь-якої автоматизованої системи. Ефективність вимірювання залежить від комплексу чинників: вибору чутливого елемента, структури перетворення, метрологічних і динамічних характеристик, а також умов експлуатації та схем узгодження сигналів. Лише цілісний аналіз цих параметрів дозволяє забезпечити високу точність проектування та стабільне функціонування вимірювальних систем у складі сучасних ТЗА.

ЛЕКЦІЯ 3. ВИМОГИ ДО ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

Забезпечення належного рівня якості, безпеки та надійності засобів автоматизації електротехнічних комплексів є однією з ключових умов ефективного функціонування сучасних виробничих і невиробничих систем. Технічні засоби автоматизації (ТЗА), будучи складовими автоматизованих систем керування, безпосередньо впливають на точність регулювання, стабільність технологічних процесів, енергоефективність та безпеку обслуговочного персоналу. У зв'язку з цим до них висувається комплекс вимог, що формуються на основі законодавчих актів, нормативно-технічної документації та міжнародних стандартів. Особливого значення набувають процедури технічного регулювання та сертифікації, які виступають інструментами державного контролю якості продукції.

Сертифікація є одним із видів технічного регулювання та передбачає підтвердження відповідності продукції встановленим вимогам шляхом проведення випробувань, експертиз та аналізу документації. Вона ґрунтується на кількісній оцінці показників якості, які визначаються відповідними нормативними документами. Вимоги до засобів автоматизації електротехнічних комплексів значною мірою обумовлені вимогами до якості кінцевого результату функціонування об'єкта керування, структура якого була розглянута раніше. Оскільки ТЗА виконують функції збору, оброблення та реалізації інформації в межах автоматизованої системи керування, їх параметри повинні забезпечувати задані показники точності, швидкодії, надійності та електробезпеки.

Основу системи технічного регулювання в Україні становлять законодавчі акти, зокрема Закон України «Про стандартизацію» та Закон України «Про технічні регламенти та оцінку відповідності». Вони визначають правові та організаційні засади розроблення, прийняття та застосування стандартів, а також процедури підтвердження відповідності продукції встановленим вимогам. Важливу роль відіграють також національні стандарти, зокрема ДСТУ 1.1:2001 «Національна стандартизація. Терміни та визначення основних понять», які формалізують понятійний апарат і забезпечують єдність термінології в галузі стандартизації.

Нормативні документи зі стандартизації в Україні поділяються на декілька категорій: міждержавні стандарти (ГОСТ, стандарти серії ISO), державні стандарти України (ДСТУ), галузеві стандарти України (ГСТУ), стандарти науково-технічних та інженерних товариств (СТТУ), технічні умови України (ТУУ) та стандарти підприємств (СТП). Така ієрархічна структура нормативної бази відповідає принципам типізації та уніфікації, що були розглянуті раніше у контексті побудови технічних засобів автоматизації. Використання міждержавних стандартів, зокрема гармонізованих з міжнародними стандартами ISO та ІЕС, забезпечує інтеграцію вітчизняної продукції у світовий ринок та підвищує її конкурентоспроможність.

Державні стандарти України встановлюють обов'язкові або рекомендовані вимоги до продукції, процесів і послуг. У випадку відсутності державних стандартів або необхідності конкретизації їх положень розробляються галузеві стандарти чи технічні умови. Галузеві стандарти застосовуються для продукції певної галузі за умови, що вони не суперечать обов'язковим вимогам ДСТУ. Технічні умови регламентують взаємовідносини між виробником і споживачем продукції, визначаючи конкретні технічні характеристики, методи контролю та умови експлуатації. Стандарти підприємств поширюються на продукцію або процеси, що використовуються виключно в межах конкретного суб'єкта господарювання.

Залежно від специфіки об'єкта стандартизації розрізняють основоположні стандарти, стандарти на продукцію, на процеси та на методи контролю. Основоположні стандарти встановлюють загальнотехнічні та організаційно-методичні положення, терміни й визначення, вимоги до сумісності, взаємозв'язку та взаємозамінності продукції. Стандарти на продукцію регламентують вимоги до груп однорідних виробів, забезпечуючи їх відповідність функціональному призначенню. Стандарти на процеси визначають послідовність і методи виконання робіт, а стандарти на методи контролю — процедури випробувань, вимірювань і аналізу характеристик продукції.

Аналіз чинної нормативної бази свідчить про відсутність єдиної системної класифікації засобів автоматизації за принципами Державної системи промислових приладів (ДСП), однак існує значна кількість стандартів, що регламентують окремі групи апаратури. Зокрема, велика частина вимог до низьковольтної комутаційної та керувальної апаратури встановлена стандартами серії ДСТУ EN 60947. Ці стандарти визначають технічні характеристики, вимоги до електричної та механічної зносостійкості, стійкості до коротких замикань, умов експлуатації та методів випробування комутаційних апаратів, автоматичних вимикачів, контакторів, пускачів електродвигунів, пристроїв аварійного зупинення, безконтактних датчиків та іншого обладнання.

Окреме місце у системі нормативного забезпечення займають стандарти, що регламентують програмовані логічні контролери, зокрема ДСТУ ІЕС 61131-1 та ДСТУ EN 61131-2. Вони встановлюють загальні вимоги до конструкції, електричних параметрів, умов експлуатації, електромагнітної сумісності, а також методи випробування програмованих контролерів, які є ключовими елементами сучасних автоматизованих систем керування. З огляду на структурну схему АСК, саме програмовані контролери виконують функції аналізу інформації, логічної обробки та формування керуючих сигналів.

Важливою групою вимог до засобів автоматизації є вимоги електробезпеки та електромагнітної сумісності. ТЗА повинні забезпечувати безпечну експлуатацію в умовах впливу електромагнітних завад, коливань напруги, імпульсних перенапруг та інших

несприятливих факторів. Недотримання цих вимог може призвести до порушення стійкості роботи системи, появи динамічних похибок або відмов, що особливо небезпечно у відповідальних технологічних процесах. Як було зазначено при розгляді динамічних режимів роботи елементів, інерційність і затримки в роботі компонентів можуть спричинити відхилення вихідних параметрів від заданих значень. Стандарти встановлюють гранично допустимі значення часу спрацювання, відхилень, перевантажень та інших показників.

До основних технічних вимог, що висуваються до засобів автоматизації електротехнічних комплексів, належать: функціональна придатність, надійність, довговічність, ремонтпридатність, ергономічність, технологічність виготовлення та економічна доцільність. Функціональна придатність означає відповідність пристрою його призначенню та здатність виконувати задані функції в межах встановлених параметрів. Надійність характеризується безвідмовністю, довговічністю та збережуваністю. В умовах експлуатації електротехнічних комплексів особливого значення набуває стійкість до вібрацій, температурних коливань, вологості та агресивних середовищ.

Таблиця 3.1

Актуальний перелік нормативних документів

Позначення стандарту	Назва (сфера застосування)
Загальні правила	
ДСТУ EN 60947-1:2017	Апаратура комутаційна та апаратура керування низьковольтна. Частина 1. Загальні правила.
Силова комутаційна апаратура	
ДСТУ EN 60947-2:2019	Частина 2. Автоматичні вимикачі.
ДСТУ EN 60947-3:2015	Частина 3. Вимикачі, роз'єднувачі, вимикачі-роз'єднувачі та комбінації запобіжник-комутаційний апарат.
ДСТУ EN IEC 60947-4-1:2019	Частина 4-1. Контактори та пускачі електродвигунів. Електромеханічні контактори та пускачі.
ДСТУ EN 60947-4-2:2014	Частина 4-2. Напівпровідникові контролери та пускачі для двигунів змінного струму.
Апаратура кіл керування та датчики	
ДСТУ EN 60947-5-1:2019	Частина 5-1. Пристрої та комутаційні елементи кіл керування. Електромеханічні пристрої кіл керування.
ДСТУ EN 60947-5-2:2015	Частина 5-2. Пристрої розподільчих кіл і комутаційні елементи. Безконтактні датчики (давачі наближення).
ДСТУ EN 60947-5-3:2018	Частина 5-3. Вимоги до пристроїв неконтактної дії з визначеним поведінням у разі відмови (PDDDB).
ДСТУ EN 60947-5-5:2015	Частина 5-5. Електричні пристрої аварійного зупинення з функцією механічного фіксування.
ДСТУ EN 60947-5-6:2017	Частина 5-6. Інтерфейс постійного струму для давачів наближення та підсилювачів (NAMUR).
ДСТУ EN 60947-5-7:2018	Частина 5-7. Вимоги до безконтактних давачів з аналоговим виходом.

Допоміжне та багатофункційне обладнання	
ДСТУ EN 60947-6-1:2018	Частина 6-1. Багатофункційна апаратура. Комутаційна апаратура перемикачів.
ДСТУ EN 60947-7-1:2017	Частина 7-1. Допоміжне обладнання. Клемники для мідних провідників.
ДСТУ EN 60947-8:2015	Частина 8. Блоки керування для вбудованого теплового захисту (РТС) обертових машин.
Програмовані логічні контролери (ПЛК)	
ДСТУ ІЕС 61131-1:2005	Контролери програмовні. Частина 1. Загальні відомості.
ДСТУ EN 61131-2:2019	Контролери програмовні. Частина 2. Вимоги до устаткування та випробування.
ДСТУ-ЗТ ІЕС/TR 61131-4:2010	Контролери програмовні. Частина 4. Настави для користувача.

Система вимог до засобів автоматизації електротехнічних комплексів є багаторівневою та охоплює правові, організаційні, технічні й метрологічні аспекти. Вона базується на законодавчих актах, національних і міжнародних стандартах, а також галузевих нормативних документах. Виконання цих вимог забезпечує створення безпечних, надійних і ефективних автоматизованих систем керування, здатних функціонувати в умовах сучасного виробництва та відповідати міжнародним стандартам якості.

ЛЕКЦІЯ 4. ДАТЧИКИ СТРУМУ І НАПРУГИ

У сучасних електротехнічних і електронних системах датчики відіграють ключову роль, оскільки саме вони забезпечують отримання інформації про параметри електричних процесів. Під датчиком у техніці розуміють пристрій, який перетворює фізичну величину (струм, напругу, температуру тощо) в сигнал, придатний для подальшої обробки.

У силовій електроніці найбільшого поширення набули датчики електричних величин — струму та напруги. Саме вони забезпечують контроль режимів роботи перетворювачів, електроприводів, інверторів, джерел живлення, систем захисту та автоматики. Без точного вимірювання струму і напруги неможливо реалізувати стабілізацію параметрів, захист від перевантажень, коротких замикань або аварійних режимів.

4.1 Датчики напруги

Найпростішим і найбільш поширеним способом вимірювання постійної напруги є використання резистивного подільника. Такий датчик складається з двох послідовно з'єднаних резисторів. Вхідна напруга подається на всю схему, а вихідна — знімається з одного з резисторів.

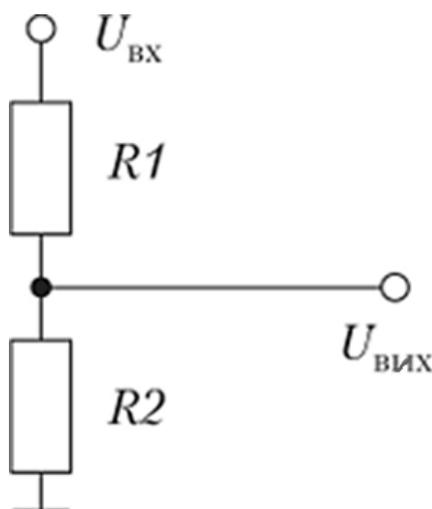


Рис. 4.1 - Найпростіший датчик напруги

Принцип роботи ґрунтується на законі Ома. Вихідна напруга становить частину вхідної і визначається співвідношенням:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.1)$$

Змінюючи співвідношення резисторів, можна отримати потрібний коефіцієнт передачі.

Переваги такого датчика:

- простота конструкції;
- низька вартість;

- висока надійність;
- лінійність характеристики;
- практично миттєва реакція на зміну напруги.

Недоліки:

- відсутність гальванічної розв'язки;
- залежність точності від температурної стабільності резисторів;
- неможливість безпечного застосування при дуже високих напругах без додаткового захисту.

Даний датчик широко використовується в регуляторах постійного струму, стабілізаторах напруги, мікроконтролерних системах.

Датчики напруги з гальванічною розв'язкою

У багатьох випадках необхідно забезпечити електричну ізоляцію між силовою частиною схеми та системою керування. Це особливо важливо у високовольтних установках. Одним із рішень є застосування оптоелектронної пари (оптопари). Вона складається зі світлодіода та фоточутливого елемента, які знаходяться в одному корпусі, але електрично ізольовані.

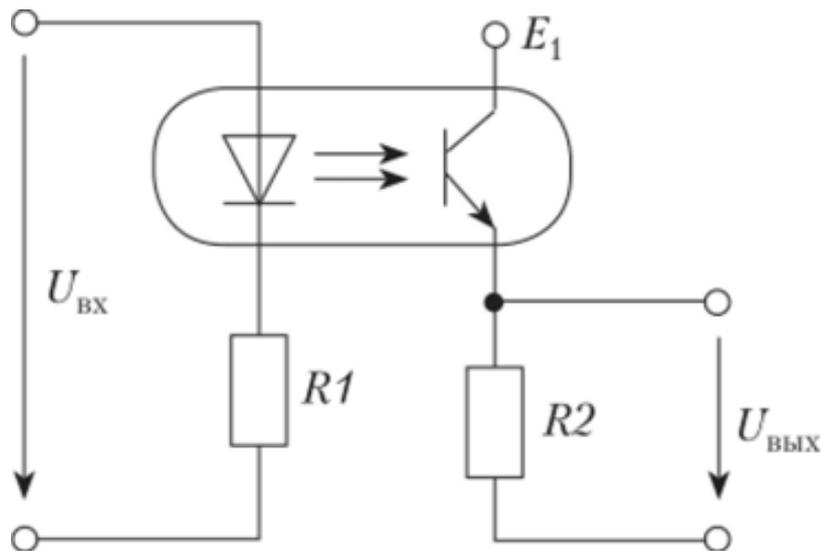


Рис. 4.2 - Датчик напруги на основі оптопари

Принцип дії полягає в тому, що вхідна напруга створює струм через світлодіод. Інтенсивність його світіння пропорційна цьому струму. Світловий потік впливає на фототранзистор, який формує вихідний сигнал. Передача інформації здійснюється через світло без прямого електричного з'єднання.

Основним недоліком таких датчиків є нелінійність передавальної характеристики та залежність параметрів від температури. Проте сучасні інтегральні ізольовані підсилювачі дозволяють значно покращити точність та забезпечити передачу аналогових сигналів у широкому частотному діапазоні.

Датчики змінної напруги

Для вимірювання змінної напруги в енергетичних системах широко застосовують вимірювальні понижуючі трансформатори напруги. Їх основна роль — не лише зменшення високої напруги до безпечного рівня, а й гальванічна розв'язка, що захищає вимірювальні прилади, контролери та персонал від небезпечного потенціалу.

Трансформатор працює на основі явища електромагнітної індукції: змінний струм у первинній обмотці створює змінний магнітний потік у магнітопроводі, який індукує напругу у вторинній обмотці.

Співвідношення напруг визначається коефіцієнтом трансформації:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.2)$$

де

- U_1, U_2 — напруга первинної та вторинної обмоток;
- N_1, N_2 — кількість витків відповідно.

Якщо кількість витків вторинної обмотки менша, напруга на виході знижується пропорційно.

4.2 Датчики струму

Найпростішим датчиком постійного струму є шунт — резистор з дуже малим опором, включений послідовно в коло навантаження. Напруга на шунті визначається за законом Ома. Ця невелика напруга підсилюється і подається в систему керування.

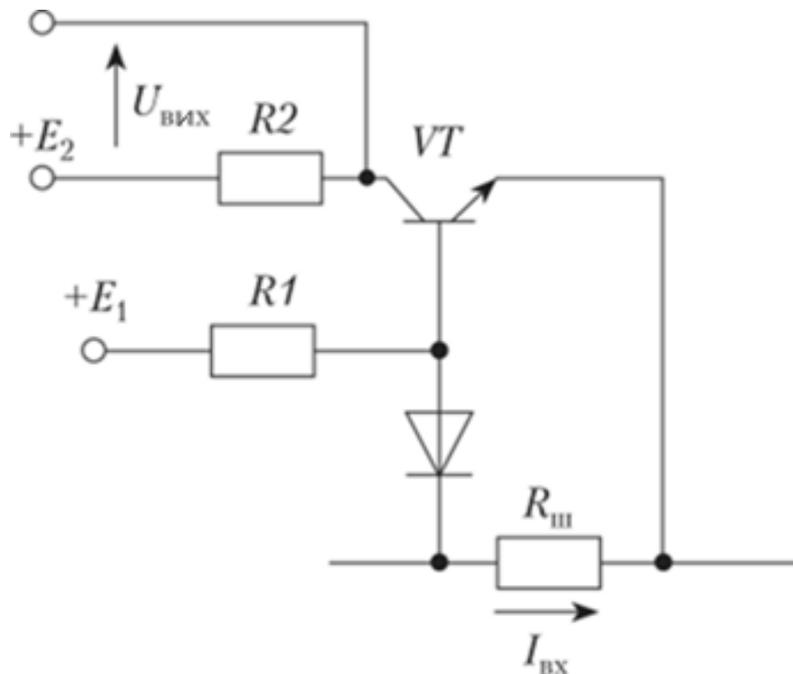


Рис. 4.3 - Датчик постійного струму з транзисторним підсилювачем

Датчики змінного струму на основі трансформатора

Для вимірювання змінного струму застосовують трансформатори струму. Вони забезпечують гальванічну розв'язку та дозволяють безпечно вимірювати великі струми.

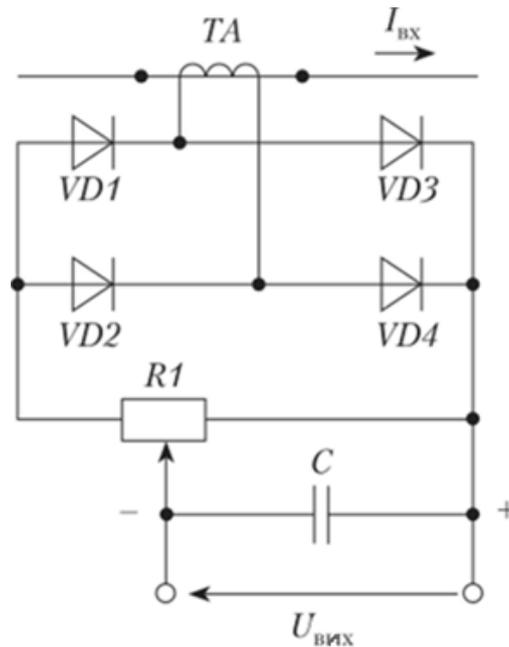


Рис. 4.4 - Датчик змінного струму на основі трансформатора струму
Співвідношення струмів у трансформаторі визначається за формулою:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.3)$$

Напруга на вимірювальному резисторі пропорційна вторинному струму. Перевагою таких датчиків є висока надійність і відсутність значних втрат потужності. Недоліком - неможливість вимірювання постійного струму.

Датчики на ефекті Холла

Сучасний етап розвитку технічних засобів автоматизації, що характеризується переходом до мікропроцесорної техніки та надвеликих інтегральних схем, потребує впровадження високоточних сенсорів із забезпеченням повної електричної ізоляції. У силовій електроніці особливе розповсюдження отримали датчики на основі ефекту Холла, які призначені для прецизійного вимірювання параметрів змінного та постійного струму або напруги з обов'язковою гальванічною розв'язкою. Конструктивною основою такого пристрою є тонка прямокутна напівпровідникова пластина, оснащена чотирма електродами: парою струмових електродів, розташованих на коротких сторонах для підведення стабілізованого струму управління ($I_{упр}$), та парою вихідних (холлівських) електродів, розміщених посередині довгих сторін для знімання інформативного сигналу.

Принцип функціонування сенсора базується на явищі виникнення поперечної різниці потенціалів під дією зовнішнього магнітного поля. Коли магнітний потік пронизує пластину,

сила Лоренца відхиляє рухливі носії зарядів струму управління, що призводить до їхньої асиметричної концентрації на вихідних електродах та формування напруги Холла.

У пристроях прямого посилення (рис. 4.5) вимірюваний струм генерує пропорційне магнітне поле, яке модулює вихідну напругу Холла. Отриманий сигнал згодом опрацьовується підсилювачем, який перетворює його у нормований вихідний струм датчика. Таке технічне рішення дозволяє ефективно контролювати параметри силових ланцюгів із величиною струму до декількох сотень ампер, зберігаючи при цьому високу лінійність та швидкодію, характерну для сучасних інерційних та безінерційних елементів систем керування.

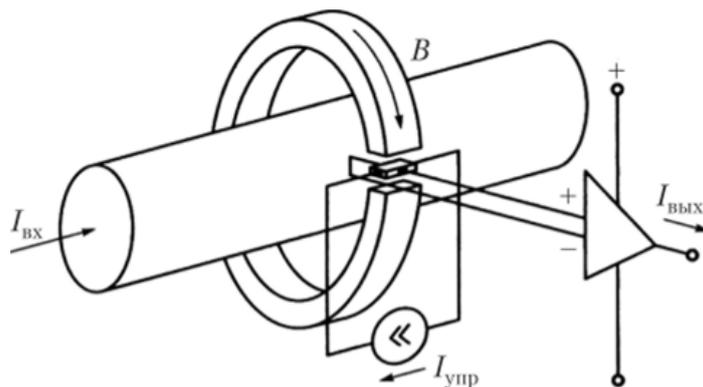


Рис. 4.5 - Принцип роботи датчика струму, заснованого на ефекті Холла

ЛЕКЦІЯ 5. ДАТЧИКИ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Датчики неелектричних величин є первинними інформаційними ланками автоматизованих систем керування та вимірювальних комплексів. Вони реалізують перетворення неперервної зміни фізичної (неелектричної) величини у сигнал електричної природи, придатний для передавання, підсилення, фільтрації, оцифрування та математичної обробки. До вхідних впливів належать переміщення і деформації, сила та момент, тиск, рівень і витрата, температура, прискорення, освітленість, акустичні та хімічні параметри середовища. За фізичним принципом дії виділяють резистивні, ємнісні, індуктивні та трансформаторні перетворювачі, п'єзоелектричні, термоелектричні, оптоелектронні та інші датчики; вибір типу визначається діапазоном, точністю, вимогами до ресурсу та умовами експлуатації.

Статичні властивості датчика описуються передатною функцією $Y=f(X)$ (калібрувальною характеристикою), де X — вхідна неелектрична величина, Y — вихідний електричний сигнал або параметр. Основною метрологічною характеристикою є чутливість — відношення приросту виходу до приросту входу; для оцінок у діапазоні використовують також відносну чутливість.

$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \quad (5.1)$$

Реальна характеристика відхиляється від номінальної через температурні впливи, нестабільність живлення, старіння матеріалів, механічні люфти, електромагнітні завади та зміни параметрів навантаження. Вимірювальний тракт зазвичай містить первинний перетворювач, інтерфейсну схему, підсилювач, фільтри та АЦП.

Резистивні датчики належать до контактних перетворювачів: вимірюване переміщення або кут повороту перетворюється на зміну активного опору шляхом переміщення повзунка по резистивній доріжці. За умови рівномірної питомої провідності та сталої геометрії доріжки опір ділянки пропорційний координаті повзунка. Для лінійного потенціометра з повним опором R_0 і довжиною доріжки l справедливо:

$$R(x) = R_0 \cdot x/l, \quad 0 \leq x \leq l \quad (5.2)$$

У режимі подільника напруги (коли вхідний опір навантаження істотно більший за опір потенціометра) вихідна напруга змінюється лінійно:

$$U_{\text{вих}}(x) \approx U_0 \cdot x/l, \quad S_u = dU_{\text{вих}}/dx \approx U_0/l \quad (5.3)$$

Максимальна напруга живлення обмежується допустимою потужністю розсіювання P_{max} резистивного елемента. Оскільки $P = U_0^2/R_0$, то $U_{0,\text{max}} = \sqrt{(P_{\text{max}} \cdot R_0)}$, а гранична чутливість:

$$S_{u,\text{max}} = \sqrt{(P_{\text{max}} \cdot R_0)}/l \quad (5.4)$$

Схеми включення резистивних датчиків залежать від способу знімання інформації та узгодження з підсилювачем або АЦП. На рисунку 49 наведено типові варіанти підключення, що застосовуються для підвищення стабільності та зменшення впливу навантаження.

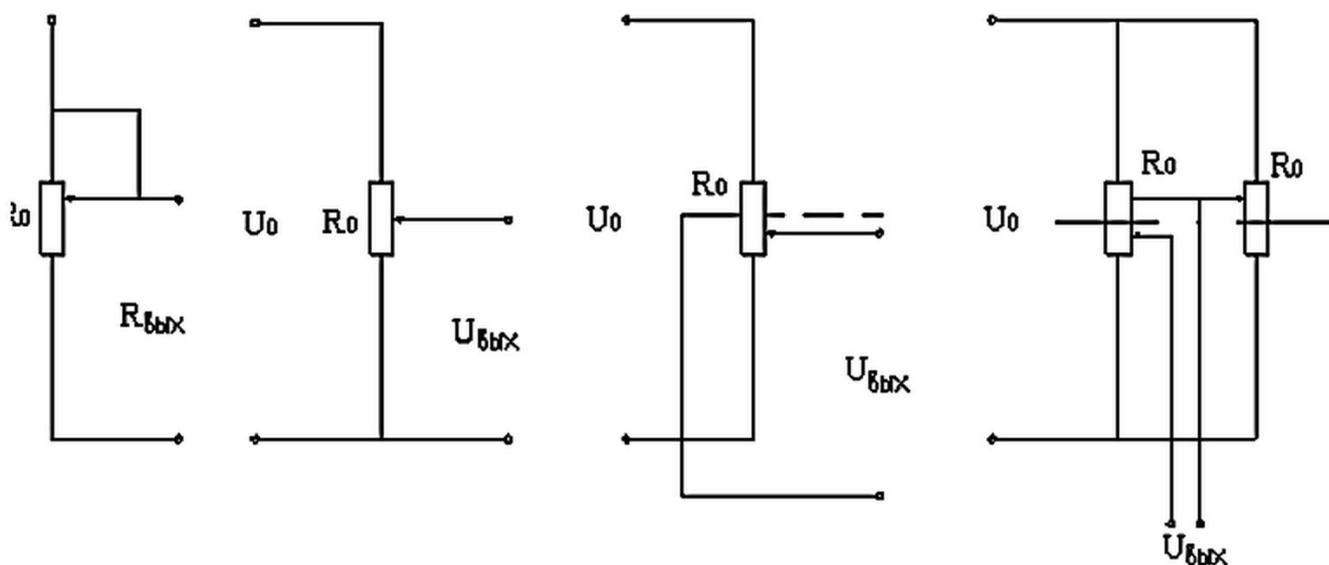


Рис. 5.1 - Схеми включення резистивних датчиків

Похибки резистивних датчиків визначаються температурною залежністю опору, нерівномірністю резистивного шару, контактним шумом і зносом повзунка. Основна експлуатаційна особливість — обмежений ресурс через тертя; проте за простоти та достатньої точності такі датчики широко застосовують у системах позиціонування.

Індуктивні датчики є безконтактними перетворювачами, у яких переміщення змінює параметри магнітного кола котушки та її індуктивність L . Для систем з домінуючим повітряним зазором індуктивність оцінюють як:

$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot S / \delta \quad (5.5)$$

За синусоїдального збудження з частотою ω амплітуда струму визначається імпедансом

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}:$$

$$I_m = U_m / \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (5.6)$$

У датчику зі змінюваним зазором $L1/\delta$ і характеристика є нелінійною; у датчику зі змінюваною площею зазора LS , що спрощує лінеаризацію в робочому діапазоні. На рисунках 5.2 – 5.3 наведено типові конструкції та якісні графіки.

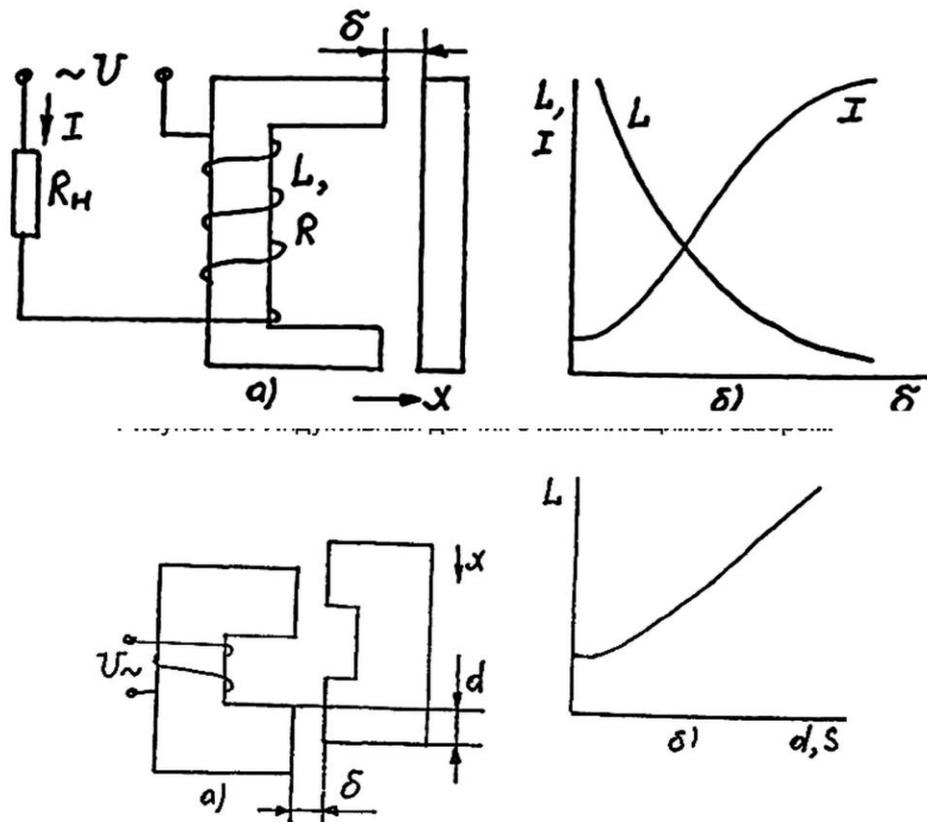


Рис. 5.2/5.3 – Індуктивні датчики: зі змінюваним зазором і зі змінюваною площею зазора.

Для $L=K/\delta$ чутливість за зазором:

$$S_{\delta} = dL/d\delta = -K/\delta^2 = -L/\delta, \quad \Delta L/L \approx -\Delta\delta/\delta \quad (5.7)$$

Силовий вплив оцінюють через магнітну енергію $W_m = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$; при сталому струмі електромагнітна сила:

$$F = \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot dL/dx \quad (5.8)$$

Для мінімізації силової дії та покращення лінійності застосовують диференціальні схеми та мостові методи з компенсаційним плечем, формуючи вимірювальний сигнал як різницю напруг або струмів у симетричних гілках.

Трансформаторні датчики ґрунтуються на зміні взаємної індуктивності та коефіцієнта магнітного зв'язку між первинною і вторинною обмотками. Найпоширеніший різновид — диференціальний трансформаторний датчик (LVDT), у якому вторинні обмотки з'єднані назустіч: у центральному положенні вихідна напруга близька до нуля, а при зміщенні виникає диференціальний сигнал, пропорційний переміщенню в околі нульової точки.

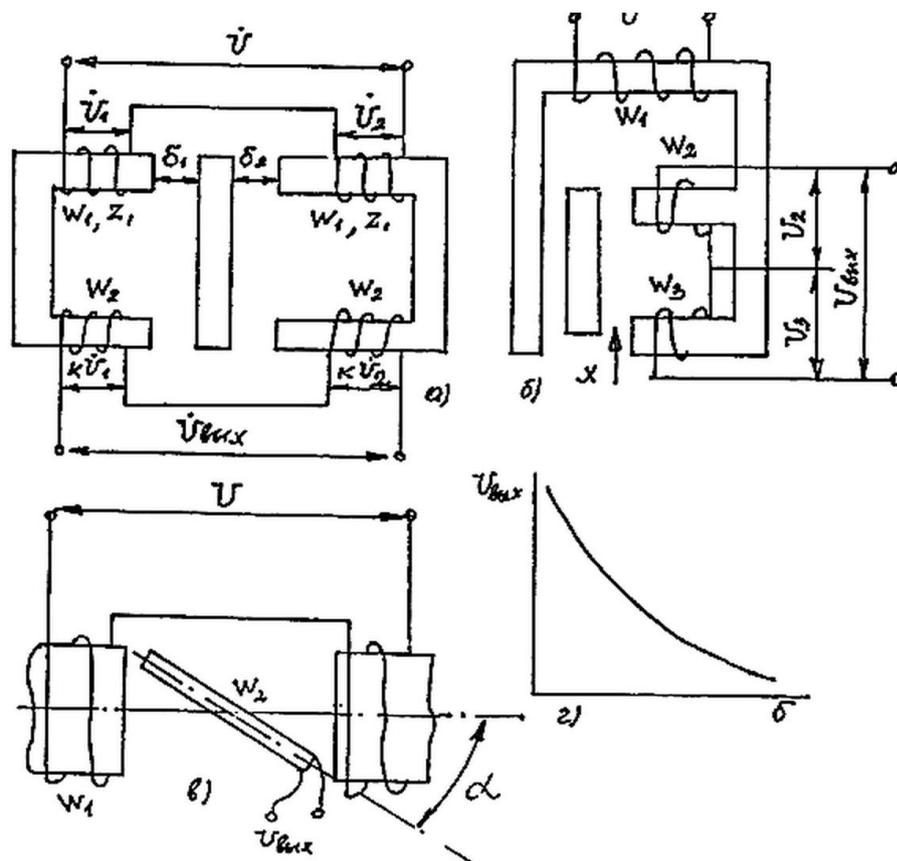


Рис. 5.4 – Трансформаторні датчики: а – диференціальний; б – зі змінюваною площею зазора; в – з поворотною рамкою.

Для датчиків кутового положення з поворотною рамкою в першому наближенні $U_{\text{вих}} \approx k \cdot \alpha \cdot \alpha$. Вимірювальний тракт часто містить підсилювач, фазочутливий детектор і фільтр для перетворення змінного сигналу у постійний, пропорційний вимірюваній величині.

Резистивні, індуктивні та трансформаторні датчики є базовими засобами перетворення переміщення і деформації у електричний сигнал. Резистивні перетворювачі прості й чутливі, але обмежені ресурсом контактної пари; індуктивні забезпечують безконтактність і механічну міцність, однак потребують стабільного збудження та врахування нелінійностей і силової дії; трансформаторні (особливо диференціальні) поєднують високу лінійність у робочій зоні та довговічність. Точність вимірювань визначають також схема включення, калібрування та урахування зовнішніх впливів.

ЛЕКЦІЯ 6. МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ЗАСОБІВ

Метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки є фундаментальною основою забезпечення точності, достовірності та відтворюваності результатів вимірювань у технічних системах. Під метрологічними характеристиками розуміють сукупність параметрів засобу вимірювання, які нормуються для визначення результату вимірювання, а також оцінювання його основних і додаткових похибок за встановлених умов експлуатації та повірки.

У технічній документації на засоби вимірювань чітко регламентуються умови контролю метрологічних характеристик, включаючи обсяг вибірки, кількість і розташування точок вимірювання в межах діапазону, допустимі значення похибок, а також умови проведення експериментальних досліджень. Контроль метрологічних характеристик здійснюється як експериментальними методами (повірка, калібрування), так і розрахунковими підходами, що дозволяє оцінити відповідність реальних параметрів встановленим нормативам.

Важливо розрізняти нормовані та дійсні метрологічні характеристики. Нормовані характеристики встановлюються нормативно-технічною документацією і визначають допустимі межі параметрів засобу вимірювання. Дійсні характеристики визначаються експериментально в процесі експлуатації або повірки та відображають реальний стан приладу. Саме порівняння цих двох груп характеристик дозволяє оцінити придатність засобу вимірювання до використання.

До основних нормованих метрологічних характеристик належить, передусім, діапазон вимірювань або розмах шкали. Він визначає межі значень вимірюваної величини, які може відображати прилад, і вибирається зі стандартного ряду відповідно до типу фізичної величини. Важливо, щоб робочий діапазон вимірювань відповідав реальним умовам експлуатації, оскільки робота поблизу меж шкали може призводити до зростання похибок.

Ключовою характеристикою є межі допустимої похибки, які зазвичай нормуються через приведену похибку та пов'язані з класом точності приладу. Основна похибка засобу вимірювання визначається як відхилення показів від істинного значення за нормальних умов експлуатації. Вона включає як систематичну, так і випадкову складові. Сумарна похибка може бути представлена у вигляді:

- Δ — межа допустимої абсолютної похибки;
- Δ_v — випадкова складова похибки;
- Δ_c — систематична складова похибки;
- $\sigma(\Delta_v)$ — середньоквадратичне відхилення випадкової складової;
- $M(\Delta_c)$ — математичне сподівання систематичної складової.

При цьому встановлюється, що не менше 90% усіх можливих значень похибки повинні знаходитися в межах допустимого інтервалу при довірчій імовірності не менше 0,95. Це забезпечує статистичну надійність результатів вимірювань.

Окрім основної похибки, значну роль відіграють додаткові похибки, які виникають під впливом зовнішніх факторів: температури, вологості, електромагнітних полів, механічних вібрацій тощо. Для кожного впливового фактора в нормативній документації встановлюються допустимі межі змін характеристик приладу. У сучасних вимірювальних системах особливо важливим є врахування цих похибок, оскільки умови експлуатації часто відрізняються від нормальних.

Суттєвими параметрами також є час вимірювання та термін експлуатації засобу вимірювальної техніки. Час вимірювання визначає швидкодію приладу, що особливо важливо для динамічних процесів, тоді як термін служби характеризує довговічність і стабільність метрологічних властивостей.

Серед інших важливих характеристик виділяють ціну поділки шкали, чутливість, варіацію показань, діапазон вимірювань, градувальну характеристику, дрейф показань і надійність. Ціна поділки шкали визначає найменшу зміну вимірюваної величини, яка може бути зафіксована приладом, і розраховується як відношення діапазону вимірювань до кількості поділок шкали. Наприклад, якщо амперметр має верхню межу 5 А і шкалу з 100 поділками, ціна поділки становить:

$$\Delta x = \frac{5}{100} = 0,05 \text{ А} \quad (6.1)$$

Чутливість приладу є важливою характеристикою, що визначає його здатність реагувати на зміну вимірюваної величини. Вона визначається як відношення зміни показу до зміни вхідної величини:

$$S = \frac{da}{dx} \quad (6.2)$$

де (da) — переміщення стрілки або зміна показу, (dx) — зміна вимірюваної величини. Наприклад, якщо відхилення стрілки на одну поділку відповідає зміні струму 0,5 мА, то чутливість становить:

$$S = \frac{1}{0,5} = 2 \text{ под/мА} \quad (6.3)$$

Важливим параметром є клас точності засобу вимірювання, який характеризує допустиму основну похибку у відсотках від верхньої межі шкали. Існують стандартні класи точності: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Клас точності визначає максимальну допустиму

похибку при нормальних умовах експлуатації. Наприклад, для приладу з класом точності 0,5 і верхньою межею 100 В максимальна похибка становить $\pm 0,5$ В.

Основна похибка виникає через внутрішні причини, такі як тертя в механізмах, похибки градування шкали, неточність виготовлення елементів приладу. Для приладів із рівномірною шкалою робочою частиною є вся шкала, а для нерівномірної — діапазон від 25% до 100% від верхньої межі.

Доцільно зазначити, що під час проведення вимірювань особливу увагу слід приділяти правильному визначенню ціни поділки шкали та класу точності, що ілюструється типовими шкалами електровимірювальних приладів (як показано на відповідному рисунку у навчальних матеріалах). Саме ці параметри безпосередньо впливають на точність інтерпретації результатів вимірювання.

Таким чином, метрологічні характеристики визначають якість вимірювального процесу і є ключовими для забезпечення єдності вимірювань. Їх правильний вибір, контроль і аналіз дозволяють підвищити надійність технічних систем, мінімізувати похибки та забезпечити відповідність результатів вимірювань сучасним вимогам стандартів.

ЛЕКЦІЯ 7. МЕХАНІЧНА ЧАСТИНА ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТА НАВАНТАЖУВАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Механічна частина електропривода являє собою сукупність обертових і/або поступальних мас, що взаємодіють між собою та утворюють єдину електромеханічну систему, яка перетворює електричну енергію в механічну роботу. Найпростішою такою системою є електродвигун, одразу пов'язаний із робочим механізмом (рис. 7.1). Незважаючи на свою структурну простоту, така система є повністю реалістичною і широко застосовується в насосних агрегатах, вентиляторах, підйомних механізмах та інших приводах, де відсутні проміжні пружні елементи.

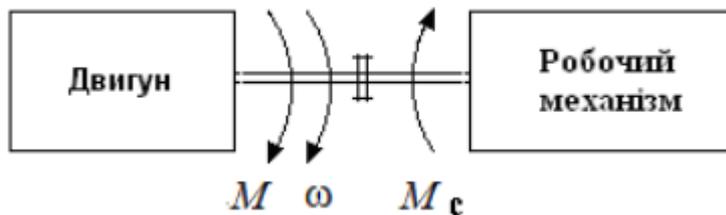


Рис. 7.1 – Найпростіша електромеханічна система

За механічними параметрами стан системи визначається двома моментами: електромагнітним моментом M , що створюється двигуном, та статичним моментом опору M_c , який чинить робочий механізм. Напрявні цих моментів є протилежними, оскільки момент опору завжди діє проти напрямку обертання ротора. Згідно з другим законом Ньютона для обертального руху, кінетична енергія та робота моментів описуються співвідношенням:

$$W = W_c + W_j$$

де W — повна енергія, що надходить до двигуна, W_c — енергія, що йде на подолання сил опору руху, і W_j — енергія, що змінює запас кінетичної енергії рухомих частин системи. Перенісши ці величини до потужностей, отримаємо:

$$P = P_c + P_j$$

— потужність, що розвивається двигуном, а ω — кутова швидкість обертання ротора (рад/с). Потужність, спрямована на зміну кінетичної енергії, виражається через похідну запасу кінетичної енергії:

$$P_j = \frac{dW_j}{dt}$$

Запас кінетичної енергії рухомих частин системи визначається як

$$W_j = \frac{1}{2} J \omega^2$$

де J — сумарний момент інерції обертючих частин системи, що включає моменти інерції як двигуна, так і навантаження:

$$J = J_d + J_m$$

Момент інерції для тіла з масою m і радіусом інерції R визначається класичним співвідношенням:

$$J = mR^2$$

Похідна кінетичної енергії за часом дає вираз для динамічного моменту:

$$M_j = J \frac{d\omega}{dt}$$

Тоді вихідне рівняння руху електромеханічної системи набуває вигляду

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt}$$

або

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c$$

Це рівняння визначає динамічну взаємодію між моментами двигуна та опору при будь-яких режимах руху, що дозволяє розв'язати два основні завдання:

1. визначити характер руху привода при відомих моментах двигуна M і опору M_c ;
2. визначити необхідну величину моменту M при заданому навантаженні M_c та заданому законі зміни частоти обертання.

Аналогічно побудоване рівняння для поступального руху:

$$m \frac{dV}{dt} = F - F_c$$

де F — рушійна сила (еквівалент моменту двигуна), F_c — статичне опірне зусилля, m — маса рухомого тіла, а V — лінійна швидкість.

На основі динамічного рівняння руху визначаються основні режими роботи електропривода, серед яких: пуск (розгін), рух із сталою швидкістю, гальмування в рушійному режимі, вільний вибіг, електричне гальмування та гальмівний режим із додатковим механічним гальмом.

Для практичних розрахунків у паспортних даних двигуна часто наводиться частота обертання n у об/хв та маховий момент GD^2 (кг·м²), що пов'язуються з кутовою швидкістю і моментом інерції:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}, \quad J = \frac{GD^2}{4}$$

У реальних електроприводах робочий механізм не завжди безпосередньо з'єднаний із двигуном. Часто між ними встановлюють проміжну передачу — редуктор, що змінює кутову швидкість і момент. Щоб спростити математичну модель, реальну систему замінюють еквівалентною приведеною системою, в якій всі моменти і сили перенесено до вала двигуна (рис. 7.2).

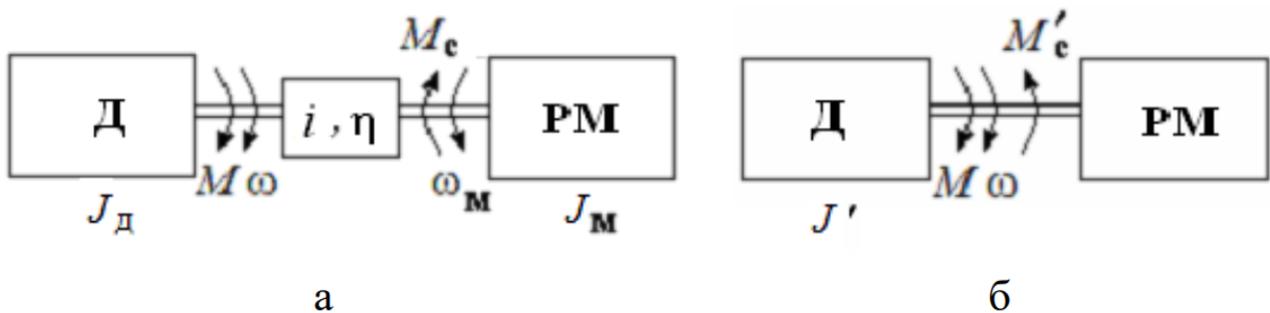


Рис. 7.2 - реальну електромеханічна система (а) / еквівалентна система (б).

Основні припущення при приведенні:

- система жорстка, без зазорів;
- моменти інерції незмінні;
- передатне відношення передачі і та коефіцієнт корисної дії η сталі;
- потужність в реальній і приведеній системах однакова.

У рушійному режимі потужність реактивних елементів передається через редуктор

$$P'_c = \frac{P_c}{\eta},$$

$$M'_c = \frac{M_c}{\eta i}.$$

Тобто приведений статичний момент опору дорівнює:

$$M'_c = \frac{M_c}{\eta i}$$

Для поступального руху, де

$$P = FV, \quad V = R\omega, \quad M = FR$$

приведене статичне зусилля:

$$F'_c = \frac{F_c}{\eta}$$

Якщо одночасно працюють кілька механізмів, то сумарні приведені моменти й сили визначаються через сумування внесків кожного навантажувального елемента.

Динамічний момент у приведеній системі визначається так:

$$M'_j = J' \frac{d\omega}{dt}$$

де приведений момент інерції системи

$$J' = J_d + \sum_k i_k^2 J_{m_k}$$

а приведена маса для поступального руху

$$m' = m_d + \sum_k i_k^2 m_{l_k}$$

Механічні характеристики описують залежність кутової швидкості двигуна від навантаження:

$$\omega = f(M)$$

а механічна характеристика механізму — залежність швидкості від приведеного статичного моменту опору:

$$\omega = f(M_c')$$

Природна механічна характеристика двигуна — це характеристика, отримана при живленні від мережі з номінальними параметрами без додаткових опорів у колах. Такі характеристики показують, як змінюється швидкість обертання при зміні навантажувального моменту (рис. 7.3), і зазвичай мають негативний нахил.



Рис. 7.3 – Механічні характеристики електродвигунів

Коефіцієнт жорсткості механічної характеристики визначається відношенням приросту моменту до відповідної зміни швидкості:

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega}$$

Чим більше абсолютне значення β , тим жорсткіша характеристика. Для механізмів цей коефіцієнт визначається аналогічно.

Статичний або усталений режим роботи електропривода досягається при

$$M_j = 0, \quad M = M_c.$$

тобто коли моменти збалансовані, а швидкість стаціонарна.

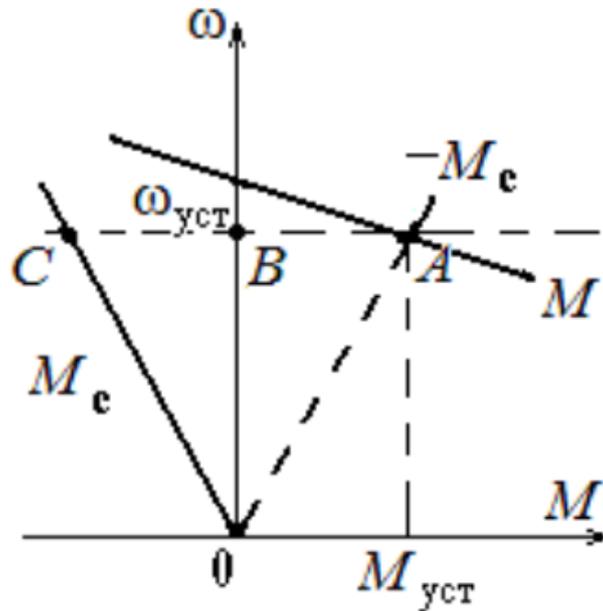


Рис. 7.4 - Накладання механічної характеристики двигуна й навантаження

Графічне визначення усталених режимів здійснюється шляхом накладання механічної характеристики двигуна й навантаження (рис. 7.4). Якщо відобразити характеристику M_c дзеркально щодо осі ω , то точка перетину з характеристикою двигуна визначить координати $\omega_{уст}$ і $M_{уст}$ статичного режиму, оскільки в цьому випадку виконується умова:

$$M + (-M_c) = 0$$

У широкому діапазоні режимів електричні машини є оборотними: вони можуть працювати як у рушійному, так і в генераторному режимах. У рушійному режимі двигун споживає електричну енергію й створює момент, співнаправлений із швидкістю ($P=M\omega>0$), а його механічна характеристика розташована у першому й третьому квадрантах (рис. 1.8). У генераторному режимі двигун працює як джерело електричної енергії — момент спрямований проти обертання ($P=M\omega<0$), і характеристика охоплює другий і четвертий квадранти.

Гальмування може здійснюватись декількома способами: у режимі вільного вибігу (коли двигун відключений від мережі й обертається під дією опору), у генераторному режимі (коли момент протидіє руху), або з механічним гальмом (із зовнішнім гальмівним моментом). Механічна частина електропривода визначає динамічні та статичні властивості системи

приводу. Рівняння руху, приведення моментів і сил та побудова механічних характеристик — ключові елементи аналізу та проектування приводів. Статичні та динамічні властивості системи впливають на вибір двигуна, передачі й керувального обладнання для забезпечення оптимальної роботи приводу в заданих умовах експлуатації

ЛЕКЦІЯ 8. ВТОРИННІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ТА СИГНАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

У сучасних системах автоматизації та збору даних вимірювальний канал формується як послідовність взаємопов'язаних перетворень: від фізичної (неелектричної) величини на об'єкті до електричного сигналу, придатного для передавання, цифрової обробки, індикації та керування. Первинний перетворювач (сенсор) безпосередньо взаємодіє з об'єктом і формує «природний» сигнал (опір, ЕРС, ємність, індуктивність, частоту, кут або переміщення), який часто є малорівневим, нелінійним і чутливим до зовнішніх впливів. Саме тому між сенсором і засобом відображення/керування вводять вторинні вимірювальні та сигнальні перетворювачі, що забезпечують узгодження, нормування та підвищення завадостійкості вимірювань. У метрологічній термінології вторинні вимірювальні прилади/перетворювачі сприймають сигнал первинного засобу та виконують його подальше перетворення для індикації, реєстрації або передавання до інших пристроїв вимірювання і керування.

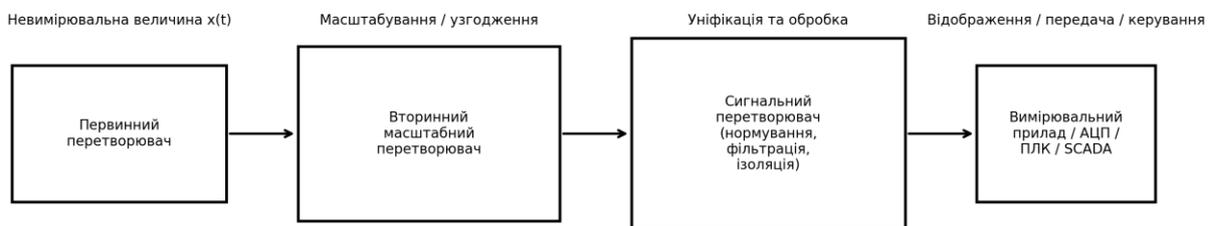


Рис. 8.1 – Структура вимірювального каналу з вторинними та сигнальними перетворювачами

Функціонально вторинні засоби вирішують дві групи задач. Перша група пов'язана з масштабуванням і узгодженням діапазонів: зменшення або збільшення струму чи напруги, перетворення опору в напругу, частоти в струм, узгодження вихідного опору джерела з вхідним опором приймача. Друга група — кондиціонування (signal conditioning): підсилення слабких сигналів (мілівольти термопар, мікрівольти тензомостів), придушення завад, корекція нуля та дрейфу, компенсація температурних впливів, лінеаризація нелінійної статичної характеристики, фільтрація, гальванічна розв'язка і формування уніфікованого або цифрового виходу. У сучасній промисловості уніфікація зазвичай означає приведення сигналу до стандартів 4–20 мА, 0–10 В або 1–5 В, а також до цифрових інтерфейсів, що підтримують діагностику та параметризацію (HART поверх струмового контуру, RS-485/Modbus, CAN, IO-Link тощо). Вибір формату визначається довжиною ліній зв'язку, вимогами електромагнітної сумісності, можливістю дистанційного живлення та сумісністю з ПЛК/SCADA.

Окремий клас складають сигнальні перетворювачі у вузькому розумінні — пристрої формування подій і повідомлень: порогові реле, компаратори, сигналізатори перевищення/зниження, модулі дискретизації та перетворювачі «аналог–дискрет». Вони

перетворюють аналогову інформацію на дискретну (релейну) за досягнення заданого рівня, часто з реалізованою гістерезисною зоною для запобігання «дребезгу» на межі порога. У цифрових системах ці функції можуть виконуватися як апаратно (на вході), так і програмно (у контролері), але високі вимоги до надійності та безпеки (SIS) нерідко потребують апаратної реалізації порогового контролю.

За домінують функцією вторинні перетворювачі можна подати як масштабні, нормуючі, підсилювальні, ізоляційні, перетворювачі роду сигналу ($U \leftrightarrow I$, $f \leftrightarrow I$, $R \rightarrow U$), обчислювальні та інтерфейсні. З позицій метрології ключовими є статичні характеристики (коефіцієнт перетворення, зсув нуля, нелінійність, гістерезис, чутливість, вхідний/вихідний імпеданс) і динамічні характеристики (час встановлення, смуга пропускання, фазові зсуви). Для цифрових каналів додатково нормуються розрядність і похибка квантування, а для промислових умов — параметри ЕМС (стійкість до імпульсних перенапруг, електростатичних розрядів, наведень у довгих кабелях).

8.1 Масштабні вторинні перетворювачі: шунти та подільники

Найпростішими й водночас надзвичайно важливими вторинними перетворювачами є масштабні елементи. У колах постійного струму для розширення меж амперметрів використовують шунти: вимірювальний механізм із опором $R_{\text{вм}}$ підключають паралельно до шунта з опором $R_{\text{ш}}$ так, щоб через механізм протікав лише його номінальний струм. Коефіцієнт шунтування $K_{\text{ш}}$ задає кратність розширення меж вимірювання. При ідеалізованому паралельному поділі струму опір шунта визначають із співвідношення:

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_{\text{вм}}}{K_{\text{ш}} - 1}$$

Для вимірювання високих напруг застосовують резистивні подільники, у яких вхідна напруга U_0 прикладається до послідовного ланцюга резисторів. Вихідну напругу $U_{\text{вих}}$ знімають з нижнього плеча, яке часто утворюється вхідним опором вторинного приладу або модуля введення. Якщо $K_{\text{д}}$ — заданий коефіцієнт поділу, то додатковий резистор $R_{\text{д}}$ для заданого вхідного опору $R_{\text{вм}}$ вибирають так:

$$R_{\text{д}} = R_{\text{вм}} \cdot (K_{\text{д}} - 1)$$

За аналогією з резистивними подільниками у високовольтних і високочастотних застосуваннях поширені ємнісні подільники, де поділ визначається відношенням ємностей, а втрати на активному опорі зменшуються. Для заданого коефіцієнта поділу $K_{\text{д}}$ і відомої ємності вимірювального елемента $C_{\text{в}}$ додаткову ємність $C_{\text{д}}$ визначають із умови серійного з'єднання:

$$C_d = \frac{C_b}{K_d - 1}$$

Практична точність масштабних перетворювачів визначається температурною стабільністю параметрів, потужністю розсіювання, самонагрівом та паразитними реактивними складовими. Для шунтів критичною є стабільність $R_{ш}$ і мінімізація термо-ЕРС у контактних з'єднаннях; у високоточних виконаннях застосовують манганінові або константанові сплави, а конструкція передбачає чотирипровідне (Кельвінове) підключення для зменшення впливу перехідних опорів. Для подільників напруги, особливо високовольтних, важливо забезпечити достатню ізоляцію, рівномірний розподіл електричного поля та стійкість до імпульсних перенапруг, а також врахувати вхідний імпеданс наступної ланки, щоб не спотворювати коефіцієнт поділу.

8.2 Вимірювальні трансформатори як вторинні перетворювачі

У колах змінного струму масштабування струмів і напруг, а також гальванічна ізоляція часто реалізуються вимірювальними трансформаторами струму й напруги. Вони перетворюють великі первинні значення до стандартизованих вторинних (типово 1 А або 5 А для трансформаторів струму; 100 В або 110 В для трансформаторів напруги), забезпечуючи одночасно електробезпеку та зниження впливу завад.

Метрологічні властивості вимірювальних трансформаторів описують класом точності та кутовою похибкою (фазовим зсувом між первинним і вторинним сигналами). На похибку впливають магнітні втрати, розсіювання потоку, навантаження вторинного кола (бурден), частота та наявність гармонік. Для трансформаторів струму необхідно дотримуватися правил експлуатації: вторинну обмотку не можна розмикати під навантаженням, оскільки це призводить до небезпечного зростання вторинної напруги. У високоточних системах, а також у мережах із несинусоїдними режимами, застосовують електронні трансформатори або датчики на ефекті Холла, які забезпечують ширший частотний діапазон і можливість вимірювати постійну складову.

8.3 Аналогове узгодження: підсилення, диференціальні входи та мостові схеми

Багато первинних сенсорів формують диференціальні або параметричні сигнали, що потребують коректного узгодження з вторинною апаратурою. Прикладом є тензорезисторні мости, датчики тиску на мембрані з мостовим виходом, платинові термперетворювачі опору, ємнісні та індуктивні перетворювачі. Типовою «вхідною» ланкою сигнального перетворювача є інструментальний підсилювач із високим коефіцієнтом придушення синфазної завади

(CMRR), який підсилює різницю потенціалів і мінімізує вплив наведень у кабелі. У найпростішій моделі диференціального підсилення вихід описують співвідношенням:

$$U_{\text{вих}} = G \cdot (U_+ - U_-)$$

Для тензомостових схем важливим є зв'язок зміни опору ΔR із вихідною напругою мосту при живленні $U_{\text{жив}}$. Для малих відносних змін опору ($\Delta R/R \ll 1$) вихід мосту можна оцінити лінійним наближенням:

$$U_{\text{мост}} \approx \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{U_{\text{жив}}}{4}$$

На практиці точність цього перетворення визначається стабільністю живлення мосту, температурними коефіцієнтами резисторів, механічними напруженнями та паразитними опорами проводів. Тому вторинні перетворювачі часто мають режим «4-провідного» підключення, активну компенсацію опору ліній, а також функції автонуля та внутрішнього калібрування. У промислових модулях введення широко застосовують збудження сенсора стабілізованим струмом або напругою, що зменшує варіабельність коефіцієнта перетворення.

8.4 Сигнальні (нормуючі) перетворювачі та уніфіковані виходи

Сигнальні перетворювачі є «інтелектуальним» прошарком між сенсором/масштабним перетворювачем і вторинним приладом або контролером. Їх призначення — перетворити неоднорідні за фізичною природою та рівнем сигнали у форму, сумісну з каналами збору даних, забезпечивши відтворюваність і стійкість до завад. Типовими операціями є підсилення (для термоЕРС), компенсація холодного спаю термопар, перетворення опору термоперетворювача у напругу/струм, лінеаризація (таблична або поліноміальна), фільтрація та гальванічна розв'язка.



Рис. 8.2 – Узагальнений склад сучасного сигнального (нормуючого) перетворювача

Одним із найстійкіших до перешкод форматів є струмовий контур 4–20 мА, у якому інформація кодується значенням струму, а падіння напруги на лінії зв'язку слабо впливає на результат за умови достатнього джерела живлення. Масштабування фізичної величини x у

межах $[x_{\min}; x_{\max}]$ на струм контуру описують лінійним законом, що забезпечує «живий нуль» (4 мА) і полегшує діагностику обриву лінії:

$$I(x) = 4 \text{ мА} + 16 \text{ мА} \cdot \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

Для узгодження струмового виходу з напруговим входом АЦП застосовують шунтовий резистор R , перетворюючи струм у напругу за законом Ома.

Поряд із аналоговими стандартами зростає роль цифрових польових шин і протоколів. У цьому випадку вторинний перетворювач виконує не лише перетворення у «значення», а й пакетування даних, часову синхронізацію, передачу діагностичної інформації (самотест, контроль перевантажень, оцінка деградації сенсора), а також прийом команд конфігурації. Така інтеграція підвищує інформативність вимірювань і зменшує кількість окремих приладів, але водночас висуває вимоги до кіберстійкості та коректної побудови часових моделей даних.

8.5 Цифрова обробка, АЦП і динаміка вторинного рівня

Процес цифровізації сучасних вимірювальних каналів зумовлює перенесення значної частини аналітичних функцій у програмне середовище (SCADA, edge-обробка або інтелектуальні модулі введення). Попри це, аналоговий каскад залишається фундаментом системи, відповідаючи за обмеження смуги пропускання та приведення рівнів напруги до вимог аналого-цифрового перетворення. Для АЦП із розрядністю N та повною шкалою FS (Full Scale) крок квантування визначається як:

$$\Delta_{ADC} = \frac{FS}{2^N}$$

При цьому теоретична похибка квантування в ідеальній моделі не перевищує половини одиниці молодшого розряду. Невід'ємним етапом підготовки сигналу є фільтрація. Низькочастотний фільтр першого порядку описується передатною функцією та має частоту зрізу що обчислюється через сталу часу :

$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau}$$

Динамічні характеристики вторинних перетворювачів, такі як час встановлення та групова затримка фільтра, критично впливають на стабільність контурів регулювання. Для високодинамічних процесів (вібрація, перехідні струми) застосовують широкосмугове підсилення та синхронну дискретизацію, тоді як для інерційних параметрів (температура) доцільним є збільшення сталої часу для ефективного придушення шумів.

8.6 Вторинні прилади: функціональність та логіка обробки

Вторинні вимірювальні прилади забезпечують фінальну стадію обробки сигналу: індикацію, реєстрацію, інтегрування та порогову сигналізацію. Хоча в сучасних архітектурах ці завдання часто виконують контролери або програмні модулі, базовою операцією залишається лінійне масштабування в інженерні одиниці за моделлю:

$$y = K \cdot x + B$$

Для реалізації порогової сигналізації в умовах завод використовують компаратори з гістерезисом. Рознесення порогів увімкнення та вимкнення запобігає "брязкоту" контактів та нестабільності стану при повільних коливаннях сигналу біля граничного значення.

У відповідальних системах вторинний рівень обов'язково доповнюється діагностичними функціями:

- Контроль цілісності ліній зв'язку.
- Детектування виходу сигналу за межі робочого діапазону.
- Журналювання подій та самоконтроль метрологічних характеристик.

Грамотне узгодження вторинного рівня з первинними сенсорами є запорукою високої заводостійкості та точності, що в контексті цифрової трансформації забезпечує можливість віддаленої діагностики та надійної інтеграції в мережеві архітектури керування.

ЛЕКЦІЯ 9. АНАЛОГО-ЦИФРОВІ ТА ЦИФРОВО-АНАЛОГОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Для узгодження цифрових пристроїв вимірювання і керування, що працюють з інформацією, представленою у двійковому коді, з давачами і виконавчими пристроями, що мають аналогові відповідно вихідні та вхідні сигнали, застосовують аналого-цифрові (АЦП) і цифро-аналогові (ЦАП) перетворювачі.

9.1 Аналого-цифрові перетворювачі

Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) — це спеціалізовані електронні пристрої, призначені для трансформації вхідних аналогових сигналів у цифрові еквіваленти, придатні для подальшого аналізу та обробки мікропроцесорними системами. Процес конвертації безперервної функції часу $U(t)$ у цифрову послідовність $\{U(t_j)\}$ базується на двох фундаментальних операціях: дискретизації за часом (перехід до значень у фіксовані моменти t_j) та квантуванні за рівнем (заміна безперервних величин дискретними значеннями).

У сучасній інженерній практиці домінує рівномірна дискретизація, теоретичним підґрунтям якої є теорема відліків (теорема Котельникова-Шеннона). Вона встановлює, що для адекватного відновлення сигналу період дискретизації має задовольняти умову $\Delta t = 1/2F_m$, де F_m - гранична частота спектра сигналу. Оскільки спектри реальних сигналів є асимптотичними, для запобігання височастотним спотворенням (ефекту накладання спектрів) застосовують або збільшення частоти дискретизації, або попередню фільтрацію за допомогою фільтрів нижніх частот.

Ефективність АЦП визначається сукупністю таких параметрів, як роздільна здатність, точність та швидкодія. Відповідно до схеми реалізації, наведеної на рисунку 9.1, АЦП класифікують за методом розгортання процесу перетворення у часі.

Основним критерієм класифікації є алгоритм наближення цифрового коду до аналогового значення, що реалізується через послідовні, паралельні або комбіновані (послідовно-паралельні) процедури. Зокрема, АЦП паралельного типу забезпечують максимальну швидкість роботи шляхом одночасного порівняння вхідного сигналу з набором опорних рівнів за допомогою масиву компараторів, тоді як послідовні структури реалізують покрокове наближення до шуканого значення.



Рис. 9.1 – Класифікація АЦП

В багатоступеневому АЦП процес перетворення вхідного сигналу розділений у просторі. На рис. 9.2 наведена схема двохступеневого 8-розрядного АЦП.

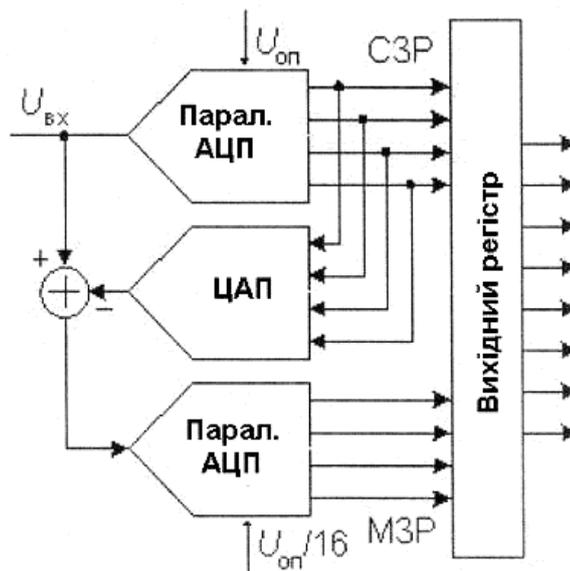


Рис. 9.2 - Двохступеневий 8-розрядний АЦП

Принцип функціонування багатоступеневих та конвеєрних аналого-цифрових перетворювачів базується на поетапному розділенні процесу формування вихідного коду. У типовій двоступеневій архітектурі верхній за схемою АЦП здійснює грубе квантування вхідного сигналу, формуючи чотири старші розряди. Отриманий цифровий код паралельно

передається на вихідний регістр та на швидкодіючий 4-розрядний цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП). Шляхом віднімання вихідної напруги ЦАП від загальної вхідної напруги формується аналоговий залишок, який надходить на вхід нижнього АЦП. Для забезпечення необхідної роздільної здатності опорна напруга другого каскаду встановлюється у 16 разів меншою, ніж у першого, що дозволяє отримати чотири молодші розряди з відповідною точністю. Важливою умовою є те, що прецизійність першого каскаду має відповідати загальній 8-розрядній точності системи. Оскільки повний цикл перетворення охоплює два такти, використання пристрою вибірки та збереження (ПВЗ) на вході є критичним для стабілізації сигналу протягом усього процесу обробки.

Для інтенсифікації обчислювальних процесів та підвищення загальної швидкодії застосовується конвеєрний принцип багатоступеневої обробки. У класичних схемах другий каскад простоює під час формування старших розрядів та встановлення сигналу ЦАП. Впровадження елементів затримки між ступенями, як показано на рис. 9.3, дозволяє перетворити систему на конвеєрний АЦП, де різні етапи обробки декількох відліків сигналу виконуються одночасно.

У такій структурі роль аналогового елемента затримки виконує додатковий пристрій вибірки та збереження (ПВЗ2), тоді як цифрова затримка реалізується за допомогою чотирьох D-тригерів. Ці тригери забезпечують синхронізацію, затримуючи передачу старшого напівбайта у вихідний регістр на один період тактового сигналу, щоб він відповідав молодшому напівбайту того ж самого відліку. Координація роботи вузлів здійснюється керуючими сигналами вибірки, які, згідно з часовими діаграмами на рис. 9.4, подаються на ПВЗ1 та ПВЗ2 зі зміщенням у часі, що забезпечує безперервність потоку даних у конвеєрі.

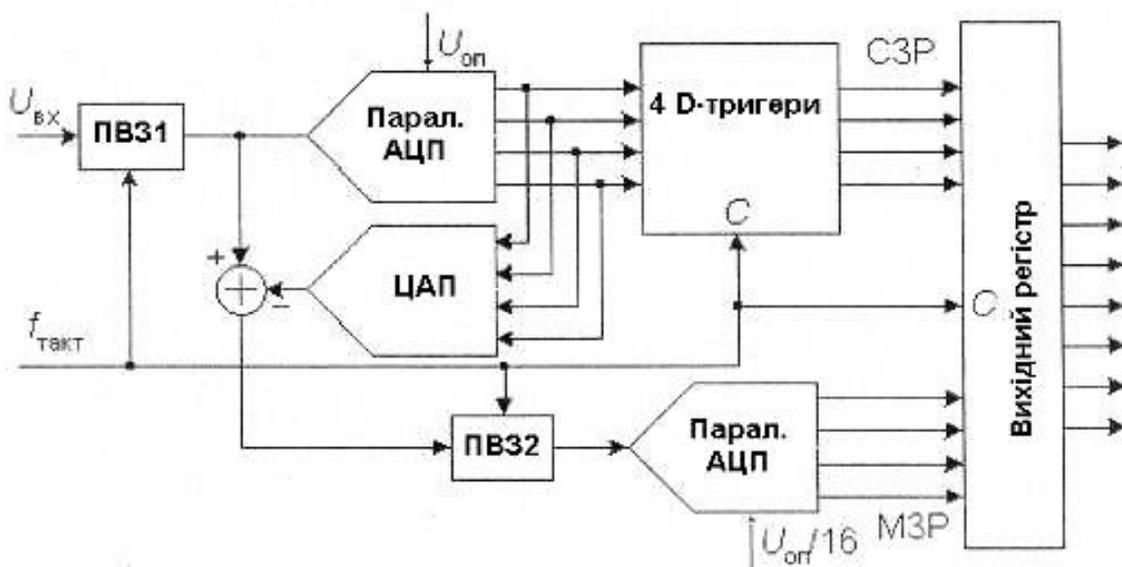


Рис.9.3. Конвеєрний АЦП

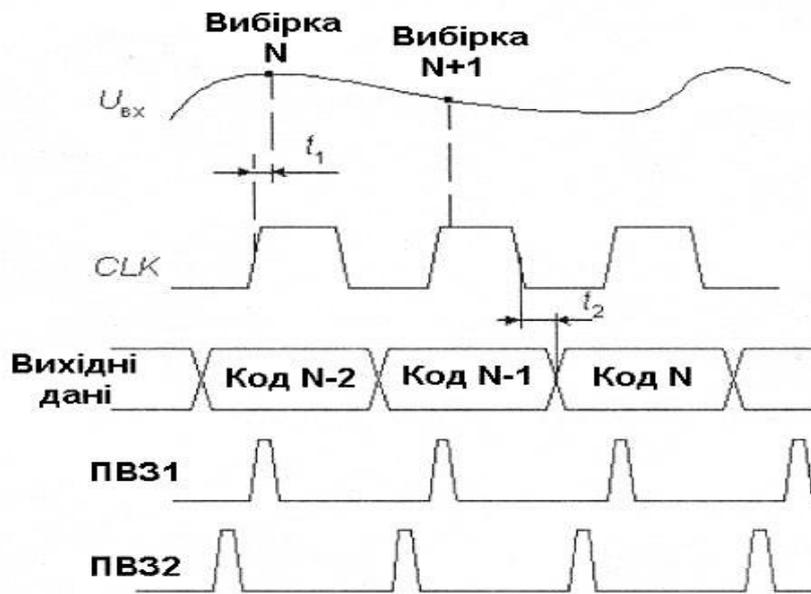


Рис.9.4. Діаграма вибірок конвеєрного АЦП

ПВ32 переходить у режим збереження пізніше, ніж ПВ31 на час, що дорівнює сумарній затримці розповсюдження сигналу по АЦП і ЦАП. Задній фронт тактового сигналу керує записом кодів в D - тригери та вихідний регістр. Повна обробка вхідного сигналу займає біля двох періодів тактових імпульсів CLK, але частота появлення нових значень вихідного коду дорівнює частоті тактового сигналу. Таким чином, конвеєрна архітектура дозволяє суттєво (в декілька разів) збільшити максимальну частоту вибірок багатоступеневого АЦП. Те, що при цьому зберігається сумарна затримка проходження сигналу, що відповідає звичайному багатоступеневому АЦП з такою ж кількістю ступенів, не має суттєвого значення, так як час наступної цифрової обробки цих сигналів все одно набагато більше цієї затримки. За рахунок цього можна без програшу у швидкодії збільшити кількість ступенів АЦП, зменшивши розрядність кожної ступені. В свою чергу, збільшення числа ступенів перетворення зменшує складність АЦП. Дійсно, наприклад, для побудови 12-розрядного АЦП з чотирьох 3-розрядних потрібно 28 компараторів, тоді як його реалізація з двох 6-розрядних потребує 126 компараторів.

Конвеєрну структуру має багато АЦП, що виготовляються зараз. Так двохступеневий 10-розрядний AD9040 виконує до 40 мільйонів перетворень за секунду, 12-розрядний AD9220 виконує до 10 мільйонів перетворень за секунду. При роботі з конвеєрним АЦП треба знати, що багато з них не допускають низьких частот вибірок, бо внутрішні ПВЗ мають велику швидкість розряду конденсаторів.

9.2 Цифро-аналогові перетворювачі

Цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП) становлять клас електронних пристроїв, функціональне призначення яких полягає у здійсненні зворотного перетворення вхідного цифрового коду у відповідний йому аналоговий сигнал. Схемотехнічна реалізація сучасних ЦАП характеризується значною різноманітністю архітектурних рішень, загальна класифікація яких за схемотехнічними ознаками представлена на рис. 9.5.

Окрім базової структури побудови, інтегральні мікросхеми ЦАП диференціюють за низкою ключових експлуатаційних та конструктивних характеристик. За фізичною природою вихідної величини розрізняють пристрої з виходом у вигляді струму або напруги. Тип цифрового інтерфейсу визначає спосіб передачі вхідних даних, що реалізується через послідовне або паралельне введення цифрового коду. За архітектурною щільністю на одному кристалі ЦАП поділяють на одноканальні та багатоканальні моделі. Важливим динамічним показником є швидкодія пристроїв, згідно з якою виділяють перетворювачі помірної та високої швидкодії, що визначає сферу їхнього застосування у системах обробки сигналів.



Рис. 9.5. Класифікація цифро-аналогових перетворювачів

Сучасна схемотехніка інтегральних мікросхем (ІМС) ЦАП переважно базується на використанні прецизійних резистивних матриць. Найбільш розповсюдженими є дві архітектури: матриці з ваговими опорами ($R, 2R, 4R, \dots, 2^n R$) та матриці дільників струму типу $R-2R$. Хоча структура з ваговими резисторами теоретично проста, її практична реалізація для високої розрядності ускладнена через технологічні труднощі виготовлення високоточних резисторів із великим діапазоном номіналів. Тому в прецизійних пристроях перевага надається матрицям $R-2R$, які потребують резисторів лише двох номіналів.

Типова структура ІМС ЦАП включає систему електронних ключів (переважно на базі польових МОН-транзисторів), які здійснюють комутацію відповідних гілок резистивної мережі згідно з комбінацією вхідного двійкового коду. Приєднана до операційного підсилювача (ОП), така матриця формує інвертуючий каскад із програмованим коефіцієнтом

передачі. Вхідна опорна напруга при цьому визначає вагове значення молодшого розряду (LSB). Вихідна напруга пристрою $U_{\text{вих}}$ для заданого вхідного коду $N_{\text{вх}}$ визначається за формулою:

$$U_{\text{вих}} = \frac{U_{\text{max}} \cdot N_{\text{вх}}}{N_{\text{max}}}$$

де U_{max} — максимальна амплітуда вихідного сигналу при подачі повного коду N_{max} .

Прикладом базової реалізації є ЦАП із ваговим підсумовуванням струмів (рис. 9.6). Архітектура включає набір резисторів, номінали яких кратні ступеням двійки, та відповідну кількість ключів, що дорівнює розрядності вхідного слова n . При замиканні ключа, що відповідає одиничному значенню розряду, через резистор протікає струм, пропорційний «вазі» цього розряду. У загальному вузлі відбувається аддитивне підсумовування струмів усіх активних гілок, що генерує сумарний вихідний струм, прямо пропорційний значенню вхідного цифрового коду $N_{\text{вх}}$.

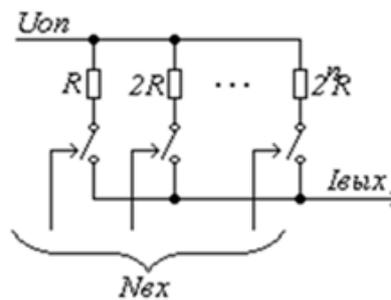


Рис. 9.6 - Схема ЦАП з виваженим сумуванням струмів

З огляду на високий опір резистивної матриці (десятки кОм), ЦАП функціонує як кероване джерело струму. Для перетворення вихідного струму в напругу, що є необхідним для більшості практичних застосувань, на виході інтегрується перетворювач «струм-напруга» на базі операційного підсилювача (рис. 9.7).

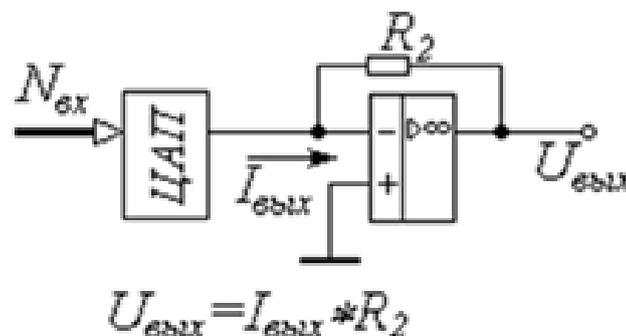


Рис. 9.7 – Структурна схема ЦАП на операційному підсилювачі

АЦП може бути побудований на основі ЦАП, лічильника імпульсів і компаратора. Спрощена структурна схема такого АЦП наведена на рис. 9.8.

Цикл перетворення аналогового сигналу, представленого у вигляді напруги $U_{вх}$ у двійковий код складається із таких операцій.

Напруга $U_{вх}$ подається на вхід пристрою – один із входів компаратора K . Сигнал з виходу компаратора дозволяє роботу генератора імпульсів Γ .

Сигнал Пуск встановлює нульовий стан і дозволяє роботу лічильника імпульсів ЛІ , що починає заповнюватися імпульсами Γ .

Код з виходу ЛІ подається на цифрові входи ЦАП (входи керування ключами). У результаті з виходу ЦАП ступінчато зростаюча напруга надходить на другий вхід компаратора. Після досягнення цієї напругою значення $U_{вх}$ компаратор забороняє роботу генератора, а на виході ЛІ маємо код, що відповідає величині $U_{вх}$.

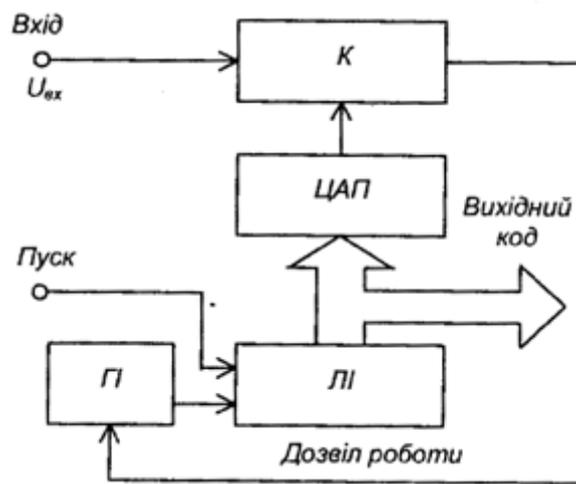


Рис. 9.8 – Структурна схема АЦП

Слід зазначити, що елементарним пристроєм перетворення аналогової величини у дискретну є компаратор, що фіксує факт перевищення однієї напруги іншою і може мати на виході сигнали, що відповідають 0 або 1.

ЛЕКЦІЯ 10. ВИКОНАВЧІ МЕХАНІЗМИ

Виконавчі механізми є завершальною ланкою систем автоматичного керування та регулювання: вони безпосередньо перетворюють керувальний сигнал у механічний вплив на регулювальний орган об'єкта (клапан, заслінку, шибер, дросель, напрямний апарат, робочий стіл тощо). На відміну від вимірювальних перетворювачів, які формують інформаційний сигнал, виконавчий механізм реалізує енергетичне перетворення та забезпечує необхідні зусилля і переміщення для зміни стану технологічного процесу. У більшості практичних застосувань безпосереднє керування регулювальним органом від первинних елементів (датчиків, реле, логічних блоків) неможливе через їхню малу потужність, тому виконавчі механізми працюють від сторонніх джерел енергії та часто містять підсилювальні ланки.

10.1 Функціональне призначення та узагальнена структура

Виконавчий механізм можна подати як сукупність перетворювача керувального сигналу, силового привода та вихідного органа, що передає зусилля або крутільний момент на регулювальний орган. У типовій структурі виділяють:

- сервомотор (електричний, пневматичний або гідравлічний привод),
- силовий перетворювач/підсилювач (за потреби),
- механічну передачу (редуктор, гвинтова пара, кривошипно-шатунний механізм),
- пристрої обмеження ходу (кінцеві вимикачі, упори),
- вузол зворотного зв'язку (датчик положення/швидкості) для замкнених систем.

Положення вихідної ланки виконавчого механізму зазвичай контролюють і передають на рівень керування, що підвищує точність та забезпечує діагностику стану привода.

10.2 Класифікація виконавчих механізмів

Класифікація виконавчих механізмів доцільна за кількома взаємодоповнювальними ознаками. За видом споживаної енергії розрізняють електричні, пневматичні та гідравлічні механізми. Електричні виконавчі механізми є найпоширенішими у загальнопромислових системах автоматизації. Пневматичні та гідравлічні механізми застосовують, коли потрібні великі силові параметри під час переміщення робочого органа або коли експлуатаційні умови є вибухонебезпечними чи вимагають підвищеної пожежної безпеки.

За характером руху вихідної ланки виконавчі механізми поділяють на прямохідні (лінійні) та поворотні (обертальні). За конструктивними ознаками відомі кривошипно-шатунні, кривошипно-кулісні, синусні, кривошипно-коромислові, мальтійські, осцилювальні механізми, а також маніпулятори як різновид виконавчих механізмів у робототехніці. Вибір

кінематичної схеми визначається вимогами до закону переміщення, передатного відношення, габаритів і жорсткості привода.

10.3 Електричні виконавчі механізми

Електричні виконавчі механізми реалізують перетворення електричної енергії в механічну, а їхніми ключовими перевагами є доступність енергоносія, зручність передачі сигналів на відстань, простота інтеграції з цифровими системами керування та високий потенціал точності позиціонування. За способом комутації та керування пуском розрізняють контактні й безконтактні електричні механізми: у контактних пуск здійснюють реверсивним магнітним пускачем, у безконтактних — магнітним підсилювачем.

У загальному випадку електричний виконавчий механізм містить реверсивний електродвигун, редуктор для зниження частоти обертання вихідного вала, вихідний елемент (шток, сектор, важіль), пристрій зупинки в крайніх положеннях (кінцеві вимикачі), вузол зворотного зв'язку для роботи в системах автоматичного регулювання або дистанційного контролю положення, а також, у частини модифікацій, ручний привід (штурвал). У приводах малої і середньої потужності застосовують двофазні конденсаторні двигуни (зокрема з порожнистим ротором), здатні до тривалої роботи в застопеному режимі при номінальній напрузі, а у приводах великої потужності — трифазні асинхронні двигуни з короткозамкнутим ротором.

Для організації зворотного зв'язку в електричних механізмах використовують перетворювачі переміщення різної фізичної природи, зокрема реостатні (потенціометричні), індуктивні та феродинамічні. Наявність зворотного зв'язку дозволяє сформувавши замкнений контур позиціонування, у якому статична похибка залежить від підсилення петлі, а динамічні властивості визначаються інерційністю двигуна, редуктора, навантаження та параметрами регулятора.

10.4 Пневматичні виконавчі механізми

Пневматичні виконавчі механізми перетворюють енергію стислого повітря на механічне переміщення вихідної ланки. За видом чутливого елемента, що перетворює тиск у перестановочне зусилля, їх поділяють на мембранні, поршневі, сильфонні та лопатеві. Лопатеві механізми безпосередньо формують поворотний рух, тоді як мембранні, поршневі та сильфонні зазвичай створюють поступальне переміщення штока, яке за потреби додатковою передачею перетворюють у поворотне. Типові робочі тиски стислого повітря для промислових ПВМ, як правило, не перевищують 0,6 МПа.

Фізично силова дія пневмопривода зумовлена різницею тисків у робочих порожнинах та ефективною площею. Для лінійного пневмоциліндра базова оцінка зусилля має вигляд:

$$F = p \cdot A$$

де p — надлишковий тиск у робочій порожнині, A — ефективна площа мембрани або поршня. У мембранних виконавчих механізмах поширені схеми з поворотно-поступальним штоком, у яких рух у одному напрямі створює тиск повітря в мембранній порожнині, а в іншому — сила пружини (пружинні мембранні механізми). Залежно від напрямку переміщення штока при зростанні тиску в порожнині розрізняють механізми прямої та зворотної дії, що важливо для вибору «безпечного» положення регульовального органа при втраті енергоносія. Поршневі механізми, порівняно з мембранними, здатні забезпечувати більший хід штока та вищі зусилля за однакових габаритів, проте потребують підвищених вимог до герметичності та якості стисненого повітря.

Динаміка пневмопривода залежить від стисливості газу, витратної характеристики пневморозподільника, об'єму камер і тертя. У спрощених інженерних моделях швидкість переміщення штока часто пов'язують із витратою повітря Q і площею A співвідношенням. Однак для точних розрахунків необхідно враховувати змінність тиску в камерах, дроселювання, а також вплив температури та режиму течії.

10.5 Гідравлічні виконавчі механізми

Гідравлічні виконавчі механізми використовують енергію робочої рідини під тиском і забезпечують високі питомі силові характеристики, плавність ходу та високу жорсткість привода. Вони широко застосовуються, зокрема, у системах керування літальними апаратами. У механічних системах золотник керування гідроприводом може переміщуватися безпосередньо проводкою керування, тоді як у системах дистанційного керування (Fly-by-Wire) привід керується електричними сигналами. Для таких систем описують кілька режимів роботи: активний (виконання команд комп'ютера), режим вільного переміщення (bypassed), режим демпфування (обмеження кутової швидкості для запобігання флатеру) та режим блокування (гідравлічний «замок» у разі відмов).

Базова силова оцінка для гідроциліндра аналогічна пневматичній, але завдяки значно вищим робочим тискам досягають великих зусиль за відносно малих габаритів. Для наближених розрахунків також використовують співвідношення:

$$F = p \cdot A$$

а швидкість штока пов'язують із витратою рідини:

$$v \approx Q / A$$

У практиці проектування істотними є втрати тиску в гідролініях, властивості робочої рідини (в'язкість, температурна стабільність), а також вимоги до фільтрації, оскільки забруднення прямо впливають на надійність золотникових пар і ущільнень.

10.6 Статичні та динамічні моделі виконавчих механізмів

Для аналізу систем керування виконавчий механізм розглядають як динамічну ланку, що зв'язує керувальний сигнал $u(t)$ із переміщенням вихідної ланки $x(t)$ або кутом повороту $\varphi(t)$. У багатьох задачах позиціонування застосовують апроксимацію виконавчого механізму ланкою першого порядку з коефіцієнтом підсилення K і сталою часу T :

$$G(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{K}{Ts + 1}$$

Дана модель адекватно описує системи, у яких домінує одна інерційна складова (сукупна інерція ротора, редуктора та навантаження) і відсутні виражені коливальні режими. Для сервоприводів із пружними елементами, люфтами або значними масами можливе коливальне (другого порядку) поведіння, що вимагає врахування власної частоти та коефіцієнта демпфування. У сучасних електроприводах регулювання швидкості і моменту реалізується внутрішніми контурами (струм/момент, швидкість), а зовнішній контур положення забезпечує високу точність, але водночас підвищує вимоги до коректного налаштування, аби уникнути перерегулювання та автоколивань.

Технічні вимоги до виконавчих елементів формують виходячи з потрібного технологічного ефекту та динаміки об'єкта. По-перше, потужність сервомотора повинна забезпечувати зміну положення регульовального органа із заданою швидкістю в усіх режимах роботи. По-друге, лінійне або кутове переміщення на виході виконавчого механізму має бути узгоджене з потрібним переміщенням регульовального органа (ходом клапана, кутом повороту заслінки тощо). По-третє, характеристика сервомотора має бути пропорційною вхідному сигналу, що є умовою відтворюваності керувальної дії в замкненому контурі. По-четверте, відношення кінетичної енергії рухомих частин до потужності сервомотора бажано мінімізувати, оскільки надлишкова інерційність погіршує швидкодію та ускладнює стабілізацію.

Під час вибору типу привода додатково враховують: необхідний діапазон зусиль/моментів і ходів; точність і повторюваність позиціонування; допустиму швидкість та прискорення; умови навколишнього середовища (температура, вологість, пил, вибухонебезпека); вимоги до безпечного положення при відмові (fail-safe); надійність та обслуговуваність; сумісність із інтерфейсами системи керування (аналогові/цифрові сигнали, протоколи зв'язку). У підсумку раціональний вибір виконавчого механізму є компромісом між енергетичними, динамічними, метрологічними та експлуатаційними вимогами конкретної системи автоматизації.

ЛЕКЦІЯ 11. РЕГУЛЮВАЛЬНІ ОРГАНИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

Регулювальні органи ЕЕС — це засоби, які реалізують керувальні впливи на генерацію, передачу й споживання електроенергії. У розрахункових моделях вони задаються як контрольні змінні з обмеженнями (P_G , Q_G , U , коефіцієнт трансформації a , шунтова/послідовна провідність тощо), а в експлуатації — як локальні та диспетчерські контури автоматичного регулювання.

Фізична основа класифікації пов'язана з балансом потужностей: дисбаланс активної потужності викликає відхилення частоти, а дефіцит реактивної потужності — зниження напруги.

Ключові групи органів регулювання:

- регулювання $P-f$;
- регулювання $Q-U$;
- керування потокорозподілом і втратами у мережі (фазозсувні/вольтододаткові трансформатори, УПК, FACTS).

Регулювання є багаторівневим і узгоджується з часовими масштабами процесів: первинні контури (секунди) реагують на збурення; вторинні (десятки секунд–хвилини) відновлюють задані значення частоти/перетоків і координують напруги; третинні (хвилини–години) виконують економічну оптимізацію режиму з урахуванням мережевих обмежень.

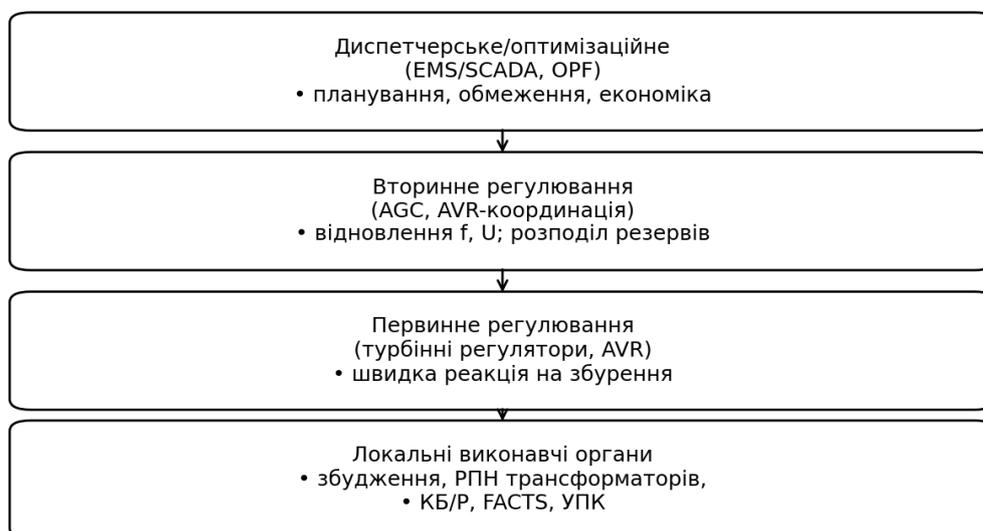


Рис. 11.1 – Ієрархія керування режимами та місце регулювальних органів

Основні виконавчі органи $P-f$ -регулювання — регулятори швидкості турбін і системи AGC, які змінюють механічну потужність P_m . Динаміка частоти визначається рівнянням руху синхронної машини:

$$\frac{2H}{\omega_s} \cdot \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - D \cdot (\omega - \omega_s)$$

У статичному наближенні первинне регулювання описують законом статизму (droop), що задає пропорційний зв'язок між відхиленням частоти й зміною активної потужності агрегату:

$$\Delta P = -\frac{1}{R} \cdot \Delta f \quad \text{та} \quad R = -\frac{\Delta f}{\Delta P}$$

Вторинне регулювання (AGC) реалізує повільнішу корекцію P^* для повернення частоти до номіналу та підтримання сальдо міжсистемних перетоків.

Рівні напруги у вузлах мережі визначаються балансом реактивної потужності. Для ліній і трансформаторів інженерна оцінка падіння напруги на ділянці має вигляд:

$$\Delta U \approx \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U}$$

Найшвидшим органом Q–U-регулювання є автоматичний регулятор напруги синхронного генератора (AVR), який змінює струм збудження та ЕРС генератора. Межі регулювання Q задаються тепловими й електромагнітними обмеженнями; у спрощеній формі:

$$P^2 + Q^2 \leq S_{\max}^2$$

$$Q_{\min} \leq Q \leq Q_{\max}$$

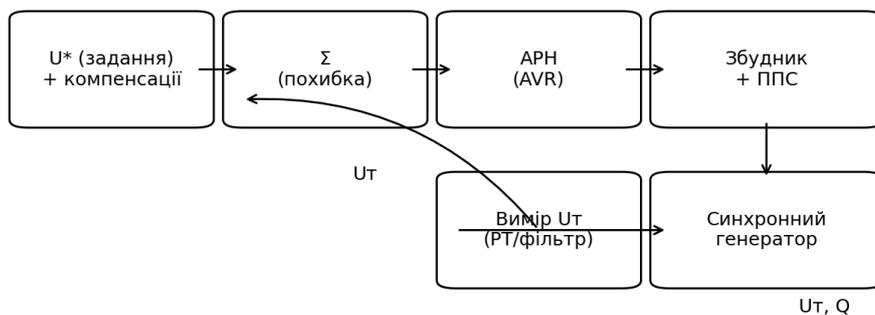


Рис. 11.2 – Структурна схема автоматичного регулювання напруги генератора

Координація реактивної потужності джерел та компенсувальних пристроїв в сучасних енергосистемах реалізується як складна оптимізаційна задача, що виконується в межах встановлених технічних обмежень для кожного генератора або компенсатора. Основними цільовими функціями при такому керуванні є мінімізація технологічних втрат активної потужності в мережах або забезпечення заданих рівнів напруги у пріоритетних вузлах навантаження шляхом мінімізації квадратичних відхилень від номінальних значень.

У ролі мережевих регулювальних органів виступають силові трансформатори, оснащені пристроями регулювання під навантаженням (РПН), ступеневі конденсаторні батареї, реактори, а також сучасні пристрої гнучких систем передачі змінного струму (FACTS), такі як статичні тиристорні компенсатори та статкоми. Математичний опис трансформаторного обладнання в сталих режимах базується на врахуванні реактивного опору, що корелює з напругою короткого замикання, та варіюванні коефіцієнта трансформації. Для моделювання ліній електропередачі традиційно застосовується П-подібна схема заміщення, де параметри активного та реактивного опору, а також ємнісної провідності визначаються відповідно до їхніх погонних значень та геометричної довжини ділянки.

Керування поточкорозподілом активної потужності здійснюється за допомогою поздовжньої компенсації та фазозсувних трансформаторів. Застосування пристроїв послідовної компенсації дозволяє знизити еквівалентний реактивний опір лінії, що безпосередньо підвищує її пропускну здатність та покращує куту стабільність системи. Введення керованої поздовжньої електрорушійної сили дає змогу ефективно перерозподіляти потужність між паралельними шляхами, оптимізуючи навантаження мережі та знижуючи сумарні втрати в неоднорідних замкнених контурах.

Аналіз та розрахунок нелінійного усталеного режиму енергосистеми базується на розв'язанні системи рівнянь балансу потужностей. Регулювальні органи впливають на параметри режиму через зміну контрольних змінних: генерації активної та реактивної потужності, рівнів напруги, коефіцієнтів трансформації та реактансів. Ефективність функціонування системи оцінюється за дотриманням нормативних обмежень щодо частоти, напруги та струмового навантаження елементів, а також за показниками стійкості та надійності. Найвищої якості керування досягають шляхом інтеграції швидких локальних контурів автоматичного регулювання з інерційними, проте енергоефективними засобами під загальною координацією диспетчерського управління.

ЛЕКЦІЯ 12. СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

12.1 Роль електроживлення в комплексах автоматизації

Електроживлення в системах автоматизації виконує не допоміжну, а системоутворювальну функцію: від стабільності та безперервності живлення залежить коректність вимірювань, робота ПЛК і мережевих комунікацій, відпрацювання алгоритмів керування та безпека технологічного процесу. Типовий контур автоматизації охоплює датчики, модулі вводу/виводу, контролер, мережеві вузли (комутатори, шлюзи), виконавчі механізми та засоби візуалізації/реєстрації. Для кожного рівня характерні власні вимоги: інформаційні та вимірювальні підсистеми критично чутливі до провалів напруги й завад, тоді як силові споживачі потребують високої перевантажувальної здатності та селективного захисту.

Проектування системи електроживлення починають із визначення категорії відповідальності навантаження, допустимого часу перерви, необхідного часу автономної роботи, а також вимог до якості напруги (відхилення, пульсації, завади, гармоніки). На практиці для засобів автоматизації найпоширеніші шини постійного струму 24 В (ПЛК, релейні модулі, польові датчики), а також 48...60 В для телекомунікаційних та мережевих вузлів; змінний струм 230/400 В використовують переважно для приводів та силових перетворювачів.

12.2 Архітектура систем електроживлення: первинні та вторинні рівні

Систему електроживлення доцільно трактувати як багаторівневу структуру. Первинний рівень формується зовнішньою електромережею та/або автономними джерелами (дизель-генератор, газопоршнева установка, сонячна генерація з інверторами). Вторинний рівень – це сукупність пристроїв перетворення та стабілізації, які формують нормовані шини живлення для апаратури. У сучасних системах застосовують модульні джерела живлення (AC/DC, DC/DC), розподільчі панелі постійного струму, системи моніторингу (телеметрія струмів, напруг, температур) та керовані захисти.

Класична схема централізованого формування постійної напруги включає випрямлячі, акумуляторну батарею (АБ) у буферному режимі та систему розподілу фідерів до груп споживачів. Таке рішення забезпечує безперервність: при зникненні мережі АБ миттєво підтримує шину DC без комутаційної паузи. Паралельне включення модулів (резервування N+1 або 2N) підвищує відмовостійкість та спрощує сервісне обслуговування.

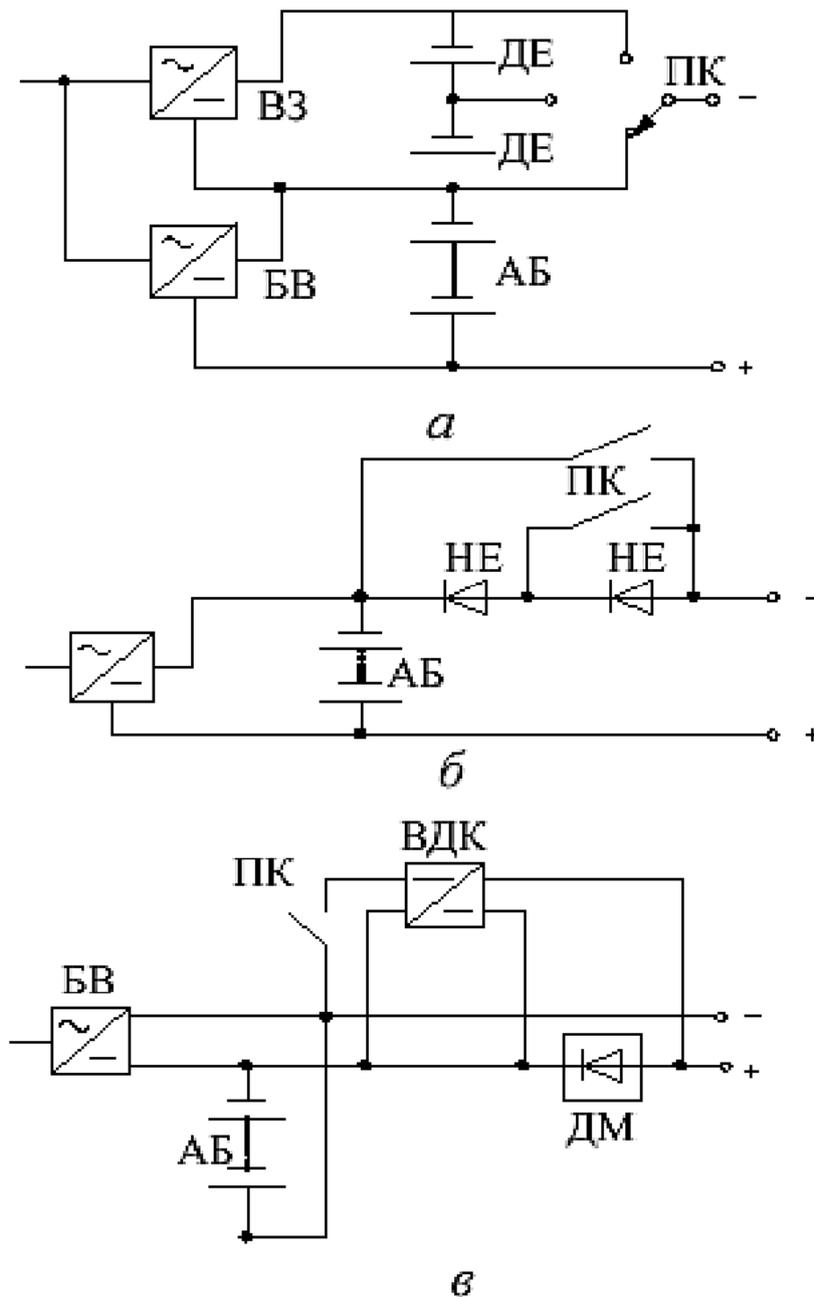


Рис. 12.1 – Типова структурна схема системи електроживлення (формування та розподіл шин AC/DC)

12.3 Вторинні джерела живлення та показники якості

Вторинні джерела живлення реалізують перетворення енергії та забезпечують необхідні параметри вихідного сигналу. Випрямлячі (AC/DC) формують постійну напругу з мережі змінного струму; перетворювачі DC/DC змінюють рівень напруги, часто забезпечуючи гальванічну розв'язку; інвертори (DC/AC) застосовують у складі ДБЖ або для живлення окремих споживачів від DC-шини. У промисловій автоматизації переважають імпульсні джерела завдяки високому ККД і широкому діапазону вхідної напруги, однак вони потребують ретельної фільтрації та ЕМС-заходів.

$$P = U \cdot I; \quad W = P \cdot t$$

де P – потужність навантаження, U – напруга, I – струм, W – енергія, t – час роботи.

Для оцінювання придатності джерела живлення задають допустиме відхилення вихідної напруги, коефіцієнт пульсацій, рівні шумів/гармонік і динамічні показники (перехідні процеси при ступінчастій зміні навантаження). Для аналогових вимірювальних трактів додатково нормують спектральний склад завад у смузі вимірювання, оскільки він безпосередньо впливає на похибку перетворення і стабільність сигналів 0–10 В або 4–20 мА.

$$\delta U = \frac{U_{\text{вих}} - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\% \quad k_{\text{п}} = \frac{U_{\sim}}{U_0} \cdot 100\%$$

де δU – відносне відхилення напруги, $k_{\text{п}}$ – коефіцієнт пульсацій, U_{\sim} – змінна складова, U_0 – постійна складова.

12.4 Резервування, ДБЖ та акумуляторні батареї

Резервування – ключовий інструмент забезпечення готовності систем автоматизації. Для інформаційної частини (контролери, комунікаційні вузли, сервери SCADA) найефективнішими є джерела безперебійного живлення (ДБЖ, UPS). Онлайн-ДБЖ подвійного перетворення ізолюють навантаження від коливань мережі, коригують напругу й частоту та здійснюють миттєве перемикання на АБ без «провалу» вихідної напруги. Для силової частини (приводи, нагрівачі, насосні агрегати) резервування частіше будують на рівні мережевих введів або автономних генераторів, поєднуючи це з пріоритезацією споживачів.

Акумуляторні батареї застосовують як джерело миттєвого резерву та для живлення в період запуску генератора. Для вибору АБ використовують розрахунок ємності з урахуванням струму навантаження, потрібного часу автономії, ККД перетворювачів і допустимої глибини розряду. У промислових умовах важливо враховувати температурну залежність доступної ємності та організувати контроль стану батарей (вимірювання напруги секцій, внутрішнього опору, температури).

$$C_{\text{АБ}} \geq \frac{I_{\text{наван}} \cdot t_{\text{рез}}}{\eta \cdot DOD}$$

де $C_{\text{АБ}}$ – потрібна ємність батареї, $I_{\text{наван}}$ – струм, $t_{\text{рез}}$ – час автономії, η – ККД, DOD – допустима частка розряду (0...1).

12.5 Дистанційне живлення мережевих пристроїв (PoE) та втрати в лінії

У сучасних системах автоматизації дедалі частіше використовують мережеві датчики, камери технічного зору та точки доступу, що живляться по кабелю Ethernet (PoE). Це зменшує кількість окремих ліній живлення, спрощує монтаж і дозволяє централізовано контролювати живлення через керований комутатор. Водночас PoE накладає обмеження за довжиною лінії та допустимою потужністю через падіння напруги на опорі провідників.

$$U_{\text{пад}} = I \cdot R_{\text{л}}; \quad P_{\text{вт}} = I^2 \cdot R_{\text{л}}$$

де $U_{\text{пад}}$ – падіння напруги на кабелі, $P_{\text{вт}}$ – втрати потужності, $R_{\text{л}}$ – опір петлі провідників.

12.6 Захист, заземлення та ЕМС-заходи

Система електроживлення повинна бути захищеною від коротких замикань, перевантажень, перенапруг та переполюсовки. Селективність захисту в колах розподілу дозволяє локалізувати аварію без відключення критичних вузлів. Для захисту від імпульсних перенапруг застосовують обмежувачі (SPD), а для мережевих і сигнальних ліній – грозозахисні модулі. Заземлення та екранування виконують за правилами електробезпеки і вимогами ЕМС: силові й сигнальні кабелі розносять, екрани підключають відповідно до частотного спектра завад, а чутливі вимірювальні ланцюги часто живлять від ізольованих DC/DC для розриву петель землі.

Ефективна система електроживлення засобів автоматизації поєднує джерела первинного живлення, модульні вторинні перетворювачі, резервування та акумуляторні системи, а також розподіл із селективним захистом і комплекс ЕМС-заходів. Сучасні тенденції включають модульність (hot-swap), архітектури N+1/2N, інтегрований моніторинг стану та розширення дистанційного живлення (PoE) для мережевої периферії. Розрахунки потужності, ємності АБ і втрат у лініях мають виконуватися разом із аналізом ризиків та вимог безперервності, що забезпечує технічно й економічно обґрунтоване рішення.

ЛЕКЦІЯ 13. ЗАХИСТ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Сучасні технічні засоби автоматизації, що включають первинні сенсори, вимірювальні перетворювачі, програмовані логічні контролери (ПЛК), модулі вводу-виводу, виконавчі приводи, мережеве обладнання та системи SCADA, функціонують у складному детермінованому середовищі. Експлуатація таких систем відбувається в умовах безперервного впливу різнорідних факторів: електричних перенапруг, електромагнітних завад, кліматичних коливань (температура, вологість), механічних навантажень (вібрація, удари) та інформаційних загроз.

Захист засобів автоматизації розглядається як багатоаспектний комплекс інженерних та програмних рішень, спрямованих на суттєве зниження імовірності відмов обладнання та локалізацію наслідків потенційних аварійних ситуацій.

Проектування захисту базується на моделі «джерело – шлях – уразливість – наслідок – бар'єр». У практиці автоматизації домінують: перенапруги та імпульси (грозові, комутаційні), перевантаження і короткі замикання, наведені перешкоди та ЕМІ, помилки РЕ/еквіпотенціальності, перегрів, волога, пил і корозія, вібрації, людський фактор і кіберінциденти. Рациональна стратегія передбачає багатошаровий захист: технічні бар'єри доповнюються процедурами контролю, навчанням персоналу та плановим технічним обслуговуванням.

Таблиця 13.1

Узагальнення загроз і протидій

Загроза	Прояв	Наслідок	Заходи захисту
Перенапруга/імпульси	Викид U на живленні/лініях	Пробій входів, відмова БЖ	SPD (тип 1–3), розрядники/TVS, грозозахист, заземлення
КЗ та перевантаження	Зростання I, нагрів	Пожежонебезпека, пошкодження провідників	Автомати/запобіжники, селективність, e-fuse, контроль напруги
ЕМІ/наведення	Шум у вимірювальних і мережевих каналах	Хибні спрацювання, втрата даних	Екрани, фільтри ЕМІ, рознесення трас, диференціальні інтерфейси
Комутація індуктивностей	Викиди при вимиканні котушок	Пробій ключів, деградація контактів	RC-снабери, варистори, діоди flyback, оптимізація контурів
Перегрів	T у шафі > норми	Старіння, дрейф, відмова	Теплорозрахунок, вентиляція/кондиціонування, дерейтинг, датчики T
Волога/пил/корозія	Конденсат, забруднення	Падіння Rізол., корозійні відмови	IP-захист, герметизація, осушення/нагрів, антикорозійні матеріали
Людський та кіберфактор	Помилки монтажу/доступу, зміна конфігурації	Простої, аварії, компрометація	Маркування/ЛОТО, тестування, сегментація мережі, RBAC, резервні копії

Електричний захист живлення передбачає коректний вибір джерела енергії, апаратів захисту та організацію електричних кіл. Потужність навантаження для постійного струму визначається співвідношенням $P = U \cdot I$, а для змінного струму — $P = U \cdot I \cdot \cos\phi$, де $\cos\phi$ враховує зсув фаз між напругою та струмом. Блоки живлення добирають із резервом 20–30 % від розрахункової потужності з урахуванням пускових струмів та можливого розширення системи. Селективність захисту досягається узгодженням часово-струмових характеристик автоматичних вимикачів і запобіжників таким чином, щоб у разі аварії відключалась лише пошкоджена ділянка. У системах 24 В DC доцільним є застосування електронних захистів із функціями обмеження струму, діагностики стану каналу та дистанційного перезапуску.

Електробезпека забезпечується системою захисного заземлення (РЕ) та зрівнюванням потенціалів. Основним критерієм є обмеження напруги дотику відповідно до умови $U_d = I_3 \cdot R_z \leq U_{\text{доп}}$, де R_z — опір заземлювача, I_3 - струм замикання на землю, $U_{\text{доп}}$ - допустима напруга дотику. У шафах керування передбачають окремі РЕ-шини, мінімізують довжину та індуктивність заземлювальних провідників, застосовують широкі мідні смуги та здійснюють контроль цілісності захисного провідника під час експлуатації.

Імпульсні перенапруги виникають унаслідок грозових розрядів або комутаційних процесів. Викид напруги при розриві струму в індуктивному колі описується залежністю $\Delta U = L \cdot di/dt$, що підкреслює важливість зменшення швидкості зміни струму та скорочення петель струму. Для захисту застосовують каскадну систему пристроїв захисту від перенапруг (SPD) за принципом «грубий – середній – тонкий» рівні: тип 1 — на вводі будівлі, тип 2 — у розподільчих щитах, тип 3 — безпосередньо біля чутливого обладнання. У сигнальних та комунікаційних колах використовують TVS-діоди, газорозрядники та гальванічну розв'язку, узгоджуючи їх параметри з робочими характеристиками сигналів.

Забезпечення електромагнітної сумісності включає раціональне трасування кабелів, екранування та фільтрацію. Силкові та сигнальні лінії прокладають роздільно, уникають довгих паралельних ділянок, а при необхідності перетинають під кутом 90°. Екрани кабелів під'єднують відповідно до частотного діапазону перешкод (одноточково для низьких частот, багатоточково для високих), застосовують феритові осердя та LC- або π -фільтри на входах пристроїв. Кліматичний захист визначається вибором ступеня IP оболонки, організацією вентиляції, осушення або підігріву для запобігання конденсації. Механічна стійкість забезпечується правильним монтажем компонентів, фіксацією провідників, використанням вібростійких клем і регулярним контролем після транспортування.

Функціональна безпека орієнтована на забезпечення переходу системи в безпечний стан у разі відмови. Для цього проводять аналіз небезпек і ризиків, визначають критичні функції та впроваджують архітектури з резервуванням і самодіагностикою. Поширеними є схеми 1oo2

або 2003, що дозволяють порівнювати канали та підвищувати достовірність спрацювання. Резервування джерел живлення, мережевої інфраструктури (кільцеві топології, дубльовані комутатори) та реалізація принципу «fail-safe» забезпечують переведення об'єкта в безпечний стан при втраті керування.

Кількісна оцінка надійності базується на інтенсивності відмов λ . Для експоненційного закону розподілу імовірність безвідмовної роботи визначається як $R(t) = e^{(-\lambda t)}$, а середній напрацювання на відмову $MTBF \approx 1/\lambda$. Ці показники застосовують для порівняння варіантів архітектури, обґрунтування резервування та визначення рівня дерейтінгу компонентів. Вбудована діагностика передбачає моніторинг напруги, струму, температури, стану апаратів захисту та журналювання подій із часовими мітками.

Нижче наведено узагальнену таблицю прикладних інженерних параметрів для шафи керування з живленням 24 В DC та підключенням до мережі 230/400 В AC.

Таблиця 13.2

Параметр	Типове значення	Пояснення застосування
Номінальна напруга живлення DC	24 В	Стандарт для систем автоматизації
Резерв потужності БЖ	20–30 %	Компенсація пускових струмів і розширення
Пусковий струм навантаження	3–7·I _n	Для двигунів, реле, ємнісних БЖ
Опір заземлювача R _з	≤ 4 Ом (типово 1–4 Ом)	Забезпечення допустимої напруги дотику
Допустима напруга дотику U _{доп}	≤ 50 В AC / 120 В DC	Згідно з вимогами електробезпеки
Час спрацювання автомата	0,01–0,4 с	Залежить від характеристики (B, C, D)
Рівень захисту оболонки	IP54–IP65	Вибір залежно від середовища
Температурний діапазон	–10...+40 °C (типово)	Без додаткового охолодження
MTBF промислового БЖ	100 000–500 000 год	За даними виробників
Категорія SPD на вводі	Тип 1	Захист від грозових імпульсів
Категорія SPD у щиті	Тип 2	Обмеження залишкової перенапруги
Захист біля обладнання	Тип 3	Тонкий захист чутливої електроніки

Комплексний підхід до захисту технічних засобів автоматизації передбачає інтеграцію електричних, електромагнітних, кліматичних і механічних заходів із процедурами функціональної безпеки та діагностики. Узгоджене застосування технічних і організаційних рішень підвищує надійність, знижує ризик аварій та забезпечує стабільне функціонування систем керування в реальних умовах експлуатації.

ЛЕКЦІЯ 14. НАДІЙНІСТЬ І ДІАГНОСТИКА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Технічні засоби автоматизації (ТЗА) складають цілісну інфраструктуру з датчиків, контролерів та виконавчих механізмів, що забезпечують повний цикл обробки інформації для керування технологічними процесами. В умовах реальної експлуатації ТЗА піддаються інтенсивному впливу термічних, електромагнітних та механічних чинників, що на фоні природного старіння компонентів висуває особливі вимоги до їхньої надійності. Саме тому невід'ємною частиною сучасних систем є інтелектуальна діагностика — комплекс процедур для оперативного виявлення, локалізації та ідентифікації несправностей апаратного й програмного забезпечення. Інтеграція діагностичних функцій безпосередньо у контури керування дозволяє не лише підтримувати безпеку поточних режимів, а й впроваджувати стратегії предиктивного сервісного обслуговування та прогнозування відмов.

Надійність ТЗА характеризує здатність системи виконувати задані функції у визначених режимах та умовах застосування протягом заданого часу. У класичній інженерній інтерпретації надійність є комплексною властивістю, що включає безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність і збережуваність. Для кількісного опису використовують імовірнісні показники, оскільки відмова є випадковою подією, зумовленою сукупністю дефектів, навантажень та зовнішніх впливів.

Основною подією є відмова - втрата здатності елемента або системи виконувати потрібну функцію. Відмови поділяють на раптові (викликані випадковим руйнуванням, перенапругою, коротким замиканням), поступові (деградація параметрів через старіння) та інтермітуючі (переривчасті, що проявляються за певних комбінацій температури, вібрацій або контактних дефектів). Важливим поняттям є працездатний стан, коли параметри ТЗА не виходять за встановлені допуски, і граничний стан, після якого використання без відновлення стає неможливим або небезпечним.

Імовірність безвідмовної роботи $P(t)$ визначається як імовірність того, що протягом часу t відмова не настане. Функція розподілу часу до відмови $F(t)$ описує імовірність настання відмови до моменту t , а густина розподілу $f(t)$ — швидкість зміни $F(t)$. Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ (параметр потоку відмов) визначається як умовна ймовірність відмови за одиницю часу за умови, що відмова до цього моменту не настала.

$$P(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(\tau) d\tau$$

Для багатьох електронних компонентів у проміжку сталої інтенсивності відмов застосовують експоненційний закон розподілу часу до відмови. У цьому випадку $\lambda(t) = \text{const} = \lambda$,

а $P(t)$ спадає експоненційно. Середній час напрацювання до відмови (MTTF/MTBF) дорівнює математичному сподіванню часу до відмови і для експоненційного закону має простий вигляд.

$$P(t) = e^{-\lambda t}$$

$$MTBF = \frac{1}{\lambda}$$

З позицій експлуатації особливо важливою є готовність (availability) — частка часу, протягом якого ТЗА здатні виконувати функцію з урахуванням відновлення. Нехай MTTR — середній час відновлення; тоді коефіцієнт готовності оцінюють як відношення середнього часу безвідмовної роботи до сумарного часу «робота + ремонт». Підвищення готовності досягається як зменшенням інтенсивності відмов, так і скороченням часу пошуку та усунення несправностей, тобто за рахунок ефективної діагностики.

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

14.1 Діагностика ТЗА: завдання, види та організація



Рис. 14.1 - Структура та задачі діагностики в системах автоматизації

Практично розрізняють вбудовану (самодіагностику) та зовнішню діагностику. Вбудована реалізується у контролерах, інтелектуальних датчиках і перетворювачах у вигляді тестів апаратури, контролю цілісності пам'яті, CRC-перевірок комунікацій, «watchdog»-

механізмів, контролю меж сигналів і діагностичних бітів протоколів. Зовнішня діагностика застосовується при налагодженні, регламентних перевірках та при складних відмовах, коли необхідно використовувати тестові генератори, калібратори, осцилографи, тепловізійний контроль або спеціалізовані програмні засоби аналізу журналів подій.

Для вимірювальних ланцюгів широко використовується струмова уніфікація 4–20 мА, яка забезпечує підвищену завадостійкість і дає змогу організувати просту діагностику обриву/короткого замикання та виходу сигналу за фізично допустимі межі шляхом розширення діагностичного діапазону (наприклад, нижче 4 мА та вище 20 мА). У польових шинах і цифрових протоколах (HART, Profibus PA, Foundation Fieldbus) додатково передаються службові параметри, що підтримують предиктивну діагностику: температура електроніки, рівень шуму, стан сенсора, статистика помилок зв'язку тощо.

14.2 Моделі діагностування та діагностичні ознаки

Математично діагностику можна інтерпретувати як задачу порівняння вимірних сигналів із еталонною моделлю об'єкта або з нормальним статистичним профілем. Основою виступають діагностичні ознаки — параметри, що змінюються при виникненні дефекту. До типових ознак належать: зсув нуля, дрейф коефіцієнта підсилення, збільшення шуму, асиметрія, нестабільність, зростання часу встановлення, збільшення пульсацій джерел живлення, часті повтори комунікаційних помилок.

Класичний підхід - метод залишків: формується оцінка вихідної величини $\hat{y}(t)$ за моделлю, а різниця між вимірним $y(t)$ і оціненим $\hat{y}(t)$ (залишок $r(t)$) аналізується пороговими або статистичними критеріями. Для стаціонарних систем з лінійною моделлю часто використовують критерій перевищення порога, а для нестационарних — ковзні вікна, спектральний аналіз і фільтрацію.

У системах керування важливо, щоб пороги спрацьовування враховували допустимі похибки вимірювання і вплив зовнішніх збурень. Тому поширеним є використання двох порогів: попереджувального (warning) та аварійного (alarm). Перший сигналізує про деградацію і ініціює обслуговування, другий — переводить систему у безпечний стан.

14.3 Способи підвищення надійності та роль резервування

Підвищення надійності ТЗА досягається шляхом: (а) підвищення якості елементної бази та конструктивного виконання (захист від пилу/вологи, температурне керування, ЕМС-заходи), (б) оптимізації режимів навантаження, (в) профілактичного та предиктивного обслуговування, (г) застосування резервування на різних рівнях системи.

Резервування може виконуватись на рівні серверів і робочих станцій (гарячий/теплий резерв), на рівні задач SCADA (окреме дублювання серверів введення-виведення, архівування, тривоги), на рівні мережі (дублювання комунікаційних ліній), а також на рівні зв'язку з польовими пристроями та контролерів. Застосування резервного каналу зв'язку дозволяє зберегти обмін даними у разі пошкодження основного каналу (наприклад, обриву кабелю) шляхом автоматичного переключення. Для критичних процесів використовують гаряче резервування контролерів або схеми потроєння з «голосуванням» результатів обробки (TMR), що підвищує безвідмовність ціною ускладнення структури і зростання вартості.

З інженерної точки зору доцільність резервування оцінюють через зміну $P(t)$. Для двох незалежних елементів, з'єднаних паралельно (резерв), імовірність безвідмовної роботи дорівнює одиниці мінус імовірність одночасної відмови обох елементів. Для експоненційних відмов ідентичних елементів це призводить до істотного підвищення безвідмовності на заданому інтервалі часу.

Практичний ефект від упровадження діагностики проявляється у зменшенні MTTR, підвищенні готовності, а також у можливості керованої деградації та планування технічного обслуговування.

Таблиця 14.1

Типові рівні реалізації діагностичних функцій у системах автоматизації.

Рівень/вузол ТЗА	Типові діагностичні засоби	Результат і практичний ефект
Польові датчики та перетворювачі	Контроль меж сигналів; діагностичний діапазон 4–20 мА; службові статуси в цифрових протоколах	Раннє виявлення обриву/КЗ, дрейфу; зниження хибних вимірювань
Комунікаційні лінії і мережа	CRC/контроль кадрів; лічильники помилок; резервні канали зв'язку; моніторинг затримок	Підвищення стійкості обміну; швидка локалізація пошкоджених сегментів
Контролери/ПЛК	Самотестування; watchdog; контроль пам'яті; дублювання CPU; «голосування» (TMR)	Зменшення імовірності відмови керування; автоматичне переключення на резерв
SCADA/сервери і задачі	Резервування серверів, задач і БД; журналювання подій; моніторинг ресурсів ОС	Збереження функцій візуалізації та архівування; зниження простоїв
Експлуатація (ТОіР)	Трендовий аналіз; предиктивні моделі; регламентні тести; калібрування	Скорочення MTTR, планування ремонту; підвищення готовності А

Надійність і діагностика є взаємодоповнювальними складовими інженерії ТЗА. Надійність визначає ймовірнісну стійкість системи до відмов, а діагностика — її здатність своєчасно виявляти дефекти, локалізувати їх і мінімізувати наслідки через швидке відновлення або безпечну деградацію. У сучасних системах автоматизації діагностичні функції реалізуються на всіх рівнях — від датчика до SCADA — та тісно інтегруються з резервуванням, журналюванням і предиктивним технічним обслуговуванням, що забезпечує підвищення коефіцієнта готовності, зменшення втрат від простоїв і підвищення безпеки технологічних процесів.

ЛЕКЦІЯ 15. ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКА ТА ОХОРОНА ПРАЦІ

Електробезпека та охорона праці при експлуатації технічних засобів автоматизації в електроенергетиці є обов'язковою складовою професійної компетентності, оскільки роботи з датчиками, вторинними колами, пристроями РЗА, шафами керування та комунікаційним обладнанням виконуються в середовищі підвищеної небезпеки. Небезпека визначається наявністю високих напруг у первинних колах, високих струмів короткого замикання, можливістю індукованих напруг у вторинних колах, наявністю оперативних кіл постійного струму (110/220 В), а також ризиками, пов'язаними з помилковим спрацюванням виконавчих механізмів і комутаційних апаратів під час робіт. Тому організація безпечної експлуатації включає технічні, організаційні та навчальні заходи, а також регламентовані процедури допуску та виконання робіт.

Базовою інженерною вимогою є розділення первинних і вторинних кіл та забезпечення гальванічної розв'язки вимірювальних трансформаторів і вторинних перетворювачів. Однак навіть у вторинних колах можливі небезпечні режими. Наприклад, вторинне коло трансформатора струму не допускає розриву під навантаженням, оскільки при розімкненні може виникнути небезпечна перенапруга на затискачах. Тому безпечна експлуатація вторинних кіл передбачає застосування короткозамикаючих клем, заземлення однієї точки вторинного кола, чітке маркування та процедури перевірки. Узагальнений принцип безпечних дій у вторинних колах СТ показано на рис. 15.1, де підкреслено послідовність «спочатку закоротити – потім від'єднати».

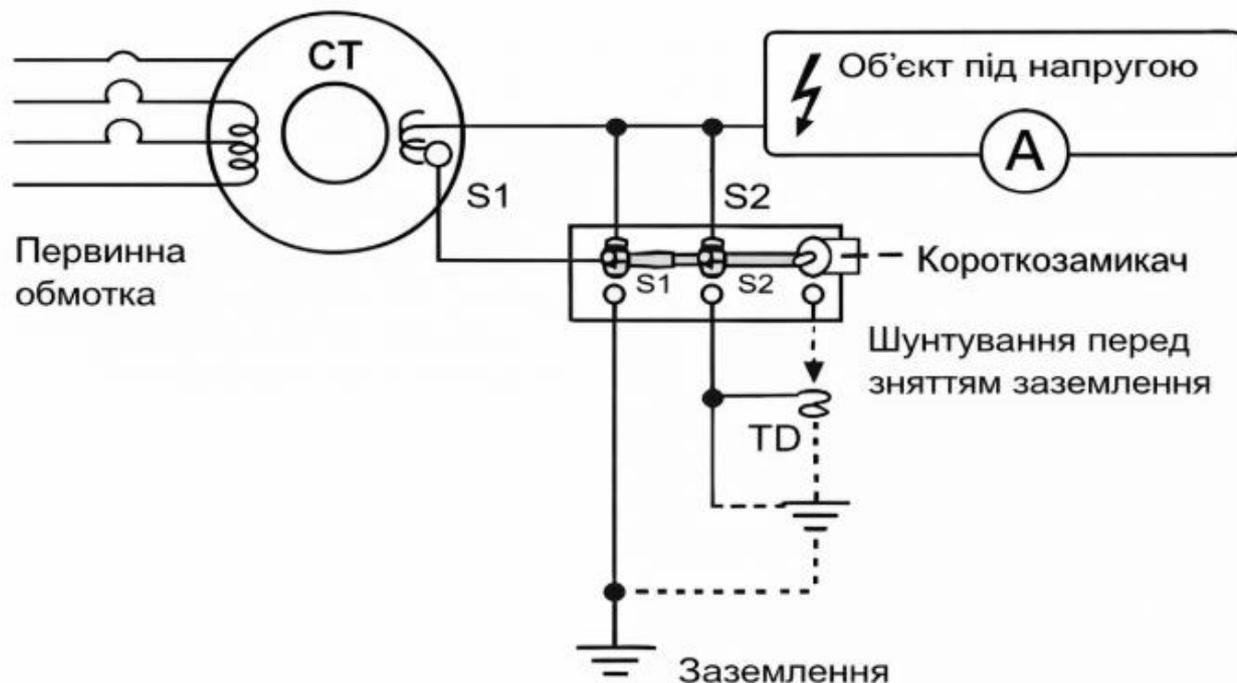


Рис. 15.1 – Принцип безпечної роботи з вторинними колами СТ: короткозамикач і заземлення.

Для вторинних кіл напруги (VT) ключовими ризиками є коротке замикання вторинного кола і перенапруги, тому застосовують запобіжники/автомати, правильне заземлення, а також процедури перевірки відсутності напруги. В оперативних колах постійного струму небезпека поєднує електричний фактор і фактор керування: помилка в колі може спричинити небажане відключення або вмикання апарата. Тому роботи в оперативних колах виконують за нарядом/розпорядженням з попереднім аналізом наслідків і, як правило, з переведенням системи в безпечний режим (блокування команд, виведення захистів у ремонт за регламентом, застосування тестових режимів).

Організаційні заходи охорони праці включають допуск персоналу за групами електробезпеки, інструктаж, застосування засобів індивідуального захисту (ЗІЗ), використання інструменту з ізоляцією, перевірку справності вимірювальних приладів і переносних заземлень, а також дотримання процедур lockout/tagout, де це застосовно. Важливою частиною є контроль помилок людини: використання чек-листів, маркування клем і кабелів, ведення журналів робіт і подвійний контроль критичних операцій.

З технічного погляду електробезпека в системах автоматизації забезпечується комплексом заходів: правильним заземленням і вирівнюванням потенціалів, екрануванням кабелів, застосуванням гальванічної розв'язки, захистом від перенапруг, дотриманням ступеня захисту оболонки і вимог до прокладання кабельних трас.

Охорона праці при роботі з ТЗА включає також ризики, не зведені лише до електрики: механічні ризики (рухомі частини приводів, раптове спрацювання виконавчих механізмів), термічні ризики (гарячі поверхні), ризики робіт на висоті, ризики в замкнених просторах, а також вплив шуму й вібрації. Для підстанційного обладнання актуальними є також газові ризики (SF₆, продукти розкладу при дугових процесах), тому роботи з газовими вимикачами виконують з урахуванням спеціальних регламентів і контролю середовища.

Електробезпека та охорона праці в експлуатації технічних засобів автоматизації є сукупністю технічних бар'єрів і організаційних процедур, спрямованих на виключення ураження електричним струмом, попередження небезпечних режимів вторинних кіл і запобігання помилковим комутаціям. Критичними є правила роботи з вторинними колами СТ, застосування захисту та розв'язки, а також дисципліна виконання робіт за регламентами й нарядами. Дотримання цих принципів є необхідною умовою надійної й безпечної експлуатації систем автоматизації електроенергетичних об'єктів.

ЛЕКЦІЯ 16. ІНТЕГРАЦІЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

Інтеграція технічних засобів автоматизації (ТЗА) в електроенергетичних системах є завершальним етапом побудови автоматизованої підсистеми, на якому окремі елементи вимірювання, перетворення, керування, зв'язку та живлення об'єднуються в цілісний функціональний комплекс із заданими показниками надійності, заводстійкості, кіберстійкості та експлуатаційної придатності. Якщо на рівні окремих лекцій розглядалися датчики, вторинні перетворювачі, АЦП/ЦАП, виконавчі механізми та питання надійності, то на рівні інтеграції ключовою стає системна узгодженість: відповідність сигналів і протоколів, сумісність електроживлення, коректна організація заземлення й екранування, синхронізація часу, єдина модель даних, керуваність конфігурації та можливість контрольованих змін протягом життєвого циклу об'єкта. У підстанційному середовищі інтеграція набуває особливого значення через високу щільність електромагнітних впливів і критичність помилок, коли неправильне підключення або некоректне узгодження логіки може спричинити хибну команду, втрату вимірювань або неправильну реакцію автоматики.

Загальну багаторівневу структуру інтегрованого комплексу ТЗА подано на рис. 16.1, де показано, що інтеграція відбувається одночасно в «вертикальному» напрямку (від датчика до диспетчерського рівня) та в «горизонтальному» (між підсистемами захисту, керування, обліку, діагностики), а цілісність забезпечують комунікаційна інфраструктура, синхронізація часу та єдина дисципліна конфігурації.

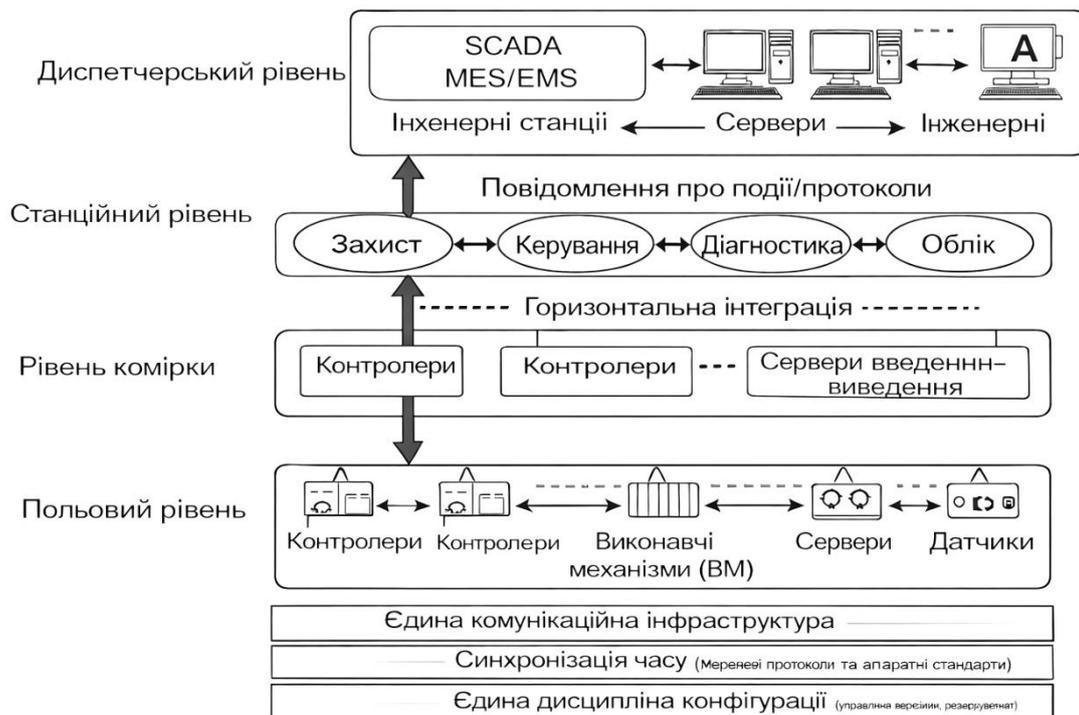


Рис. 16.1 – Узагальнена архітектура інтеграції ТЗА в ЕЕС: польовий рівень – рівень комірки – станційний – диспетчерський

Із **рис. 16.1** випливає, що інтеграція не зводиться до «під'єднати дроти» або «налаштувати протокол», а є процедурою забезпечення узгодженості функцій і гарантій: канал вимірювання має потрібну метрологію, канал керування має підтвердження виконання і міжблокування, канал зв'язку має визначену затримку та резервування, а живлення і заземлення мінімізують ризики відмов через ЕМС і імпульсні перенапруги. Тому інтеграцію доцільно описувати як набір шарів, що охоплюють фізичні інтерфейси, логічні інтерфейси, рівень даних і рівень експлуатаційного керування. Таке узагальнення наведено в табл. 16.1, де кожний шар має власні критерії правильності.

Таблиця 16.1

Шари інтеграції ТЗА та ключові критерії коректності

Шар інтеграції	Зміст	Критерій «коректно інтегровано»
Фізичний	клеми, кабелі, полярність, екран, заземлення, розв'язка	відсутність петель заземлення, правильна полярність СТ/VT, коректні навантаження, перевірені ізоляція/контакти
Електричний сигнал	діапазони 4–20 мА/0–10 В, дискретні рівні, фільтрація, антидребезг	сигнал у допуску, діагностика обриву/КЗ працює, шум не спричиняє хибних станів
Логічний	адресація DI/DO, інверсії, міжблокування, підтвердження станів	команда не виконується без дозволу блокувань; є підтвердження результату; аварійні стани мають пріоритет
Дані/протоколи	модель тегів, часові мітки, протоколи обміну	дані інтерпретуються однаково у всіх підсистемах; мітки часу узгоджені; відмова зв'язку діагностується
Експлуатаційний	керування версіями, журнали змін, тестові режими, резервування	зміни відслідковуються й відкатні; тестування не впливає на роботу; резервні канали працездатні

Практична інтеграція вимірювальних і керувальних каналів починається з інвентаризації «сигнал–функція–місце», тобто з формального опису, який сигнал який процес описує, у якій точці він формується, яким інтерфейсом передається і в якій логіці використовується. Такий опис реалізують у вигляді матриці сигналів (I/O list), де для кожного каналу задається тип, діапазон, масштабування, нормальний стан, допустимі межі, діагностичні ознаки та пов'язана

функція автоматики. Узагальнено логіку такої матриці показано на рис. 16.2, де відображено зв'язок «датчик → нормування → AI → тег → алгоритм → команда → підтвердження».

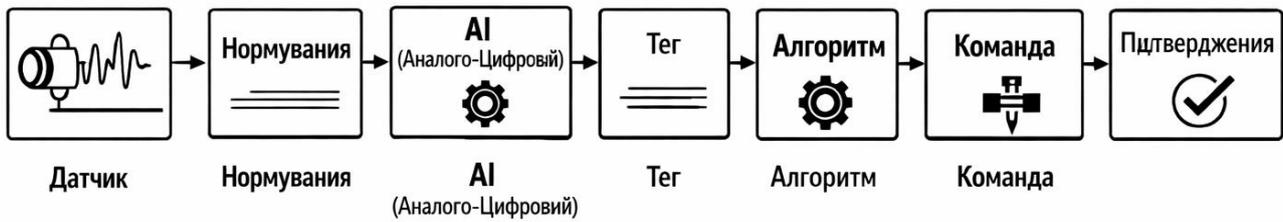


Рис. 16.2 – Логічний ланцюг інтеграції сигналів: від фізичного каналу до функції та підтвердження виконання

На етапі інтеграції обов'язковою є перевірка метрологічної цілісності: масштабування має відповідати паспортному діапазону, полярність і фазування СТ/VT повинні забезпечувати правильний знак потужності та коректні фазові співвідношення, а фільтрація не має приховувати важливі перехідні процеси. Паралельно перевіряється відмовобезпечність: обрив лінії 4–20 мА має переходити у «недостовірно», NC-логіка дискретних кіл повинна трактувати обрив як аварію, а в критичних командах мають існувати апаратні міжблокування або дубльовані умови. При цьому інтеграція не може вважатися завершеною без випробувань: заводських (FAT), приймально-здавальних на об'єкті (SAT), а також функціональних випробувань із моделюванням типових аварійних і технологічних сценаріїв у безпечних умовах тестового режиму.

ЛЕКЦІЯ 17. ПРОМИСЛОВІ КОНТРОЛЕРИ ТА ПЛК. МІКРОКОНТРОЛЕРНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Промислові контролери, зокрема програмовані логічні контролери (ПЛК), є базовими обчислювальними засобами автоматизації, що забезпечують реалізацію алгоритмів керування технологічними процесами, логіки блокувань, оброблення дискретних і аналогових сигналів, а також комунікацію з верхніми рівнями SCADA. Для електроенергетичних об'єктів ПЛК застосовуються у підсистемах допоміжних процесів (охолодження, компресорні установки, маслостанції, приводи арматури), у системах власних потреб, а також як частина інтегрованих комплексів станційної автоматики. Мікроконтролерні системи керування, у свою чергу, є основою «вбудованих» пристроїв автоматики: модулів вводу/виводу, інтелектуальних датчиків, приводних контролерів, комунікаційних шлюзів, локальних регуляторів і спеціалізованих IED, де реальний час, енергоефективність і компактність визначають архітектуру. На системному рівні ПЛК і мікроконтролери доповнюють один одного: ПЛК забезпечує стандартизований інженерний цикл налаштування та експлуатації, а мікроконтролер забезпечує спеціалізовані функції на периферії.

Приклад модульної конфігурації ПЛК наведено на рис. 17.1 (на прикладі SIMATIC S7-1500): системний модуль живлення, CPU та модулі вводу/виводу, встановлені на монтажній рейці. Комунікаційні інтерфейси в промислових ПЛК можуть бути інтегровані в CPU або реалізовані окремими комунікаційними модулями залежно від платформи.

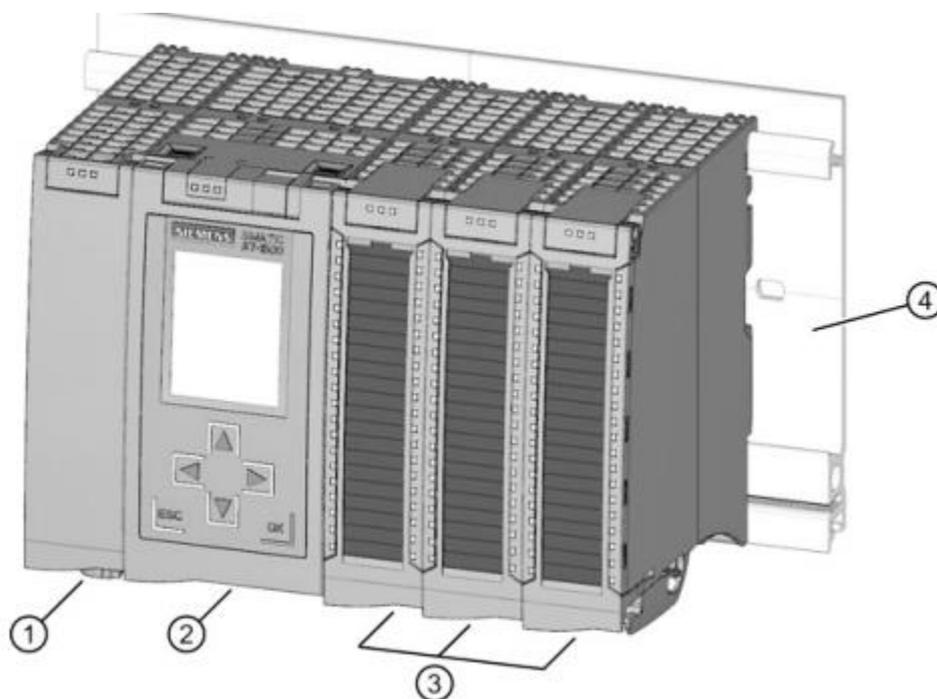


Рис. 17.1 - Приклад модульної конфігурації ПЛК (SIMATIC S7-1500): системний модуль живлення, CPU, модулі вводу/виводу на монтажній рейці

1. Модуль живлення системи (або Блок живлення системи)

2. Центральний процесор (CPU)
3. Модулі вводу/виводу (I/O модулі)
4. Монтажна шина з інтегрованим профілем DIN-рейки (або з профілем стандарту «top-hat»)

Виконання програми в ПЛК зазвичай організовано як циклічна обробка (scan cycle) з обміном між фізичними входами/виходами та образом I/O у пам'яті (I/O memory / process image). Типовий цикл включає службові операції (самодіагностика), виконання користувацької програми, I/O refresh (обмін із модулями вводу/виводу) та периферійне обслуговування; узагальнену схему наведено на рис. 17.2.

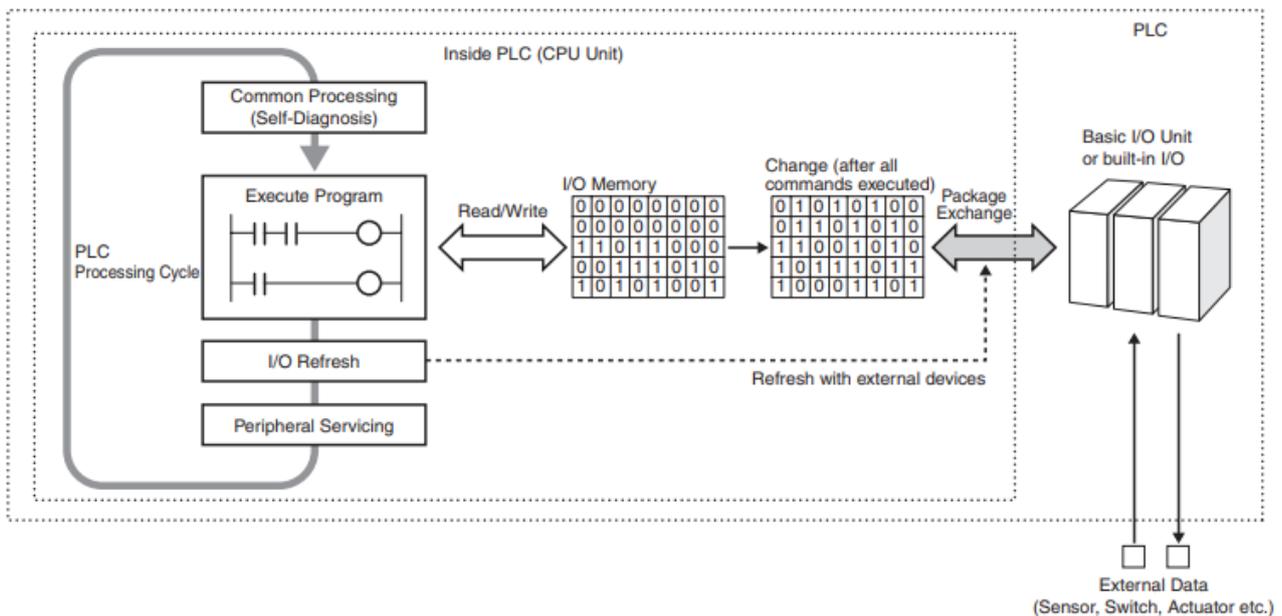


Рисунок 17.2 – Типовий цикл обробки ПЛК (scan cycle) та I/O refresh: самодіагностика → виконання програми → обмін 'I/O memory' з модулями I/O → периферійне обслуговування.

Інженерна практика проектування програм ПЛК спирається на стандартизовані мови програмування (IEC 61131-3), що забезпечує переносимість підходів і можливість формалізованого тестування. Вибір мови визначається природою задачі: релейна логіка зручна для блокувань, структурований текст — для обчислень, функціональні блоки — для регулювання. Разом із тим важливо не «мовне питання», а забезпечення детермінованості та прозорості логіки, коли кожний стан має визначений набір умов і пріоритетів, а аварійні стани мають домінуючі правила.

Мікроконтролерна система керування відрізняється від ПЛК тим, що зазвичай є одноплатним або вбудованим рішенням, яке безпосередньо працює з периферією (АЦП, таймери, інтерфейси) і часто реалізує реальний час із жорсткими обмеженнями затримок. Типову блокову діаграму мікроконтролера як ядра вбудованої системи наведено на рис. 17.3

(на прикладі сімейства STM32F103): ядро CPU, пам'ять Flash/SRAM, системні шини та контролери DMA, периферійні модулі (таймери, АЦП) і комунікаційні інтерфейси. На рівні системи керування до мікроконтролера додаються зовнішні вузли: джерела живлення та захисти, узгодження сигналів, силові драйвери, датчики й виконавчі механізми.

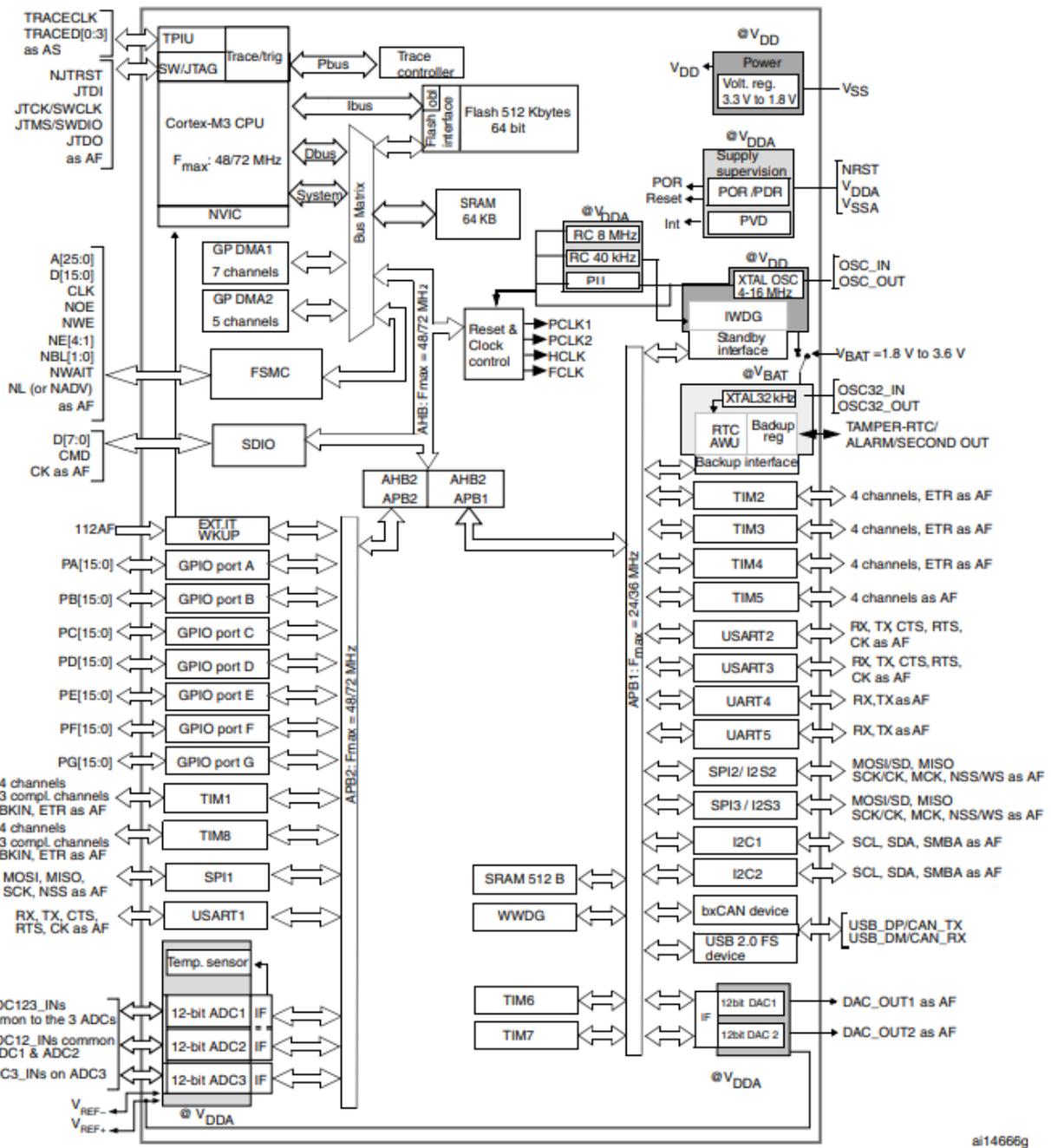


Рис. 17.3 – Блок-діаграма мікроконтролера (приклад: STM32F103xC/D/E): CPU Cortex-M3, Flash/SRAM, шини, DMA, периферія та інтерфейси

Для енергетичних застосувань вибір між ПЛК та мікроконтролерним рішенням визначається масштабом і відповідальністю задачі, вимогами сертифікації та обслуговування. ПЛК є доцільним там, де потрібні стандартизовані інструменти експлуатації, швидке внесення змін, широка номенклатура модулів I/O і документовані механізми діагностики.

Мікроконтролер є доцільним там, де потрібні спеціалізовані функції з низькою затримкою, висока інтегрованість, низьке енергоспоживання і можливість створення «вбудованого» приладу. У реальних комплексах часто реалізується комбінований підхід: ПЛК керує технологічним процесом і обміном із SCADA, а мікроконтролери реалізують периферійні модулі вимірювань, локальні захисти, інтерфейсні перетворення та датчики.

ЛЕКЦІЯ 18. ПРОМИСЛОВІ МЕРЕЖІ ТА ПРОТОКОЛИ. ЗАСОБИ ПЕРЕДАЧІ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Промислові мережі забезпечують обмін даними між польовими пристроями (датчики, актуатори), контролерами PLC/RTU, станційними серверами та диспетчерськими системами (SCADA/EMS). Для автоматизації критичні детермінізм і стійкість: затримка має бути передбачуваною, джитер — обмеженим, а відмови — локалізованими. У технологічних мережах домінують вимоги реального часу, завадостійкості, резервування та кіберзахисту, а сама мережа розглядається як частина контуру керування.

Технологічна інформація включає циклічні дані керування (уставки, зворотні зв'язки), події та аварійні повідомлення, вимірювання повільних і швидких процесів, а також сервісні дані (параметри, діагностика, журнали). Параметри обміну формалізують через швидкість і затримки; у критичних застосуваннях додатково нормують частку втрат та точність часу.

- Бітова швидкість:

$$R_b = \frac{N_b}{T}$$

- Час передавання кадру L (біт):

$$t_{tx} = \frac{L}{R_b}$$

- Затримка «кінець-у-кінець»:

$$t_{e2e} = t_{proc} + t_{queue} + t_{tx} + t_{prop}$$

Готовність (доступність) каналу/вузла часто оцінюють як:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

де $MTBF$ — середній час між відмовами, $MTTR$ — середній час відновлення.

Комунікації організують ієрархічно: польовий рівень → рівень контролера → станційний/цеховий → диспетчерський. Вертикальна інтеграція переносить первинні сигнали до рівнів оптимізації й планування, а горизонтальна — узгоджує взаємодію підсистем керування, захисту, обліку та діагностики. Узгодженість забезпечують синхронізація часу (IEEE 1588 PTP) та дисципліна конфігурації (керування версіями параметрів і топології).

На польовому рівні застосовують RS-485 і CAN, HART поверх 4–20 мА та IO-Link для інтелектуальних датчиків. Для верхніх рівнів переважає Industrial Ethernet (комутатори, VLAN, пріоритизація). Витя пара є економічною, оптоволокну забезпечує імунітет до завод і

великі відстані, а радіоканал дає мобільність, але потребує контролю спектра та кіберзахисту. Вибір середовища визначається довжиною ліній, умовами завод, потребою гальванічної розв'язки, вибухонебезпечністю та вимогами сервісу.

Польові шини (Modbus RTU, PROFIBUS, CANopen) орієнтовані на циклічний обмін у межах комірки/цеху та відносно просту діагностику. Industrial Ethernet (PROFINET, EtherNet/IP, Modbus TCP) дає високу швидкість і гнучку топологію, а для вимог реального часу застосовують пріоритизацію, синхронізацію та, за потреби, планування трафіку (принципи TSN). На рівні інтеграції поширений OPC UA, який вводить семантичні моделі даних і стандартизовані механізми безпеки. В енергетиці IEC 61850 забезпечує швидкі події та цифрові вибірки, що дозволяє реалізовувати захисти та автоматику на основі мережевої взаємодії між інтелектуальними електронними пристроями.

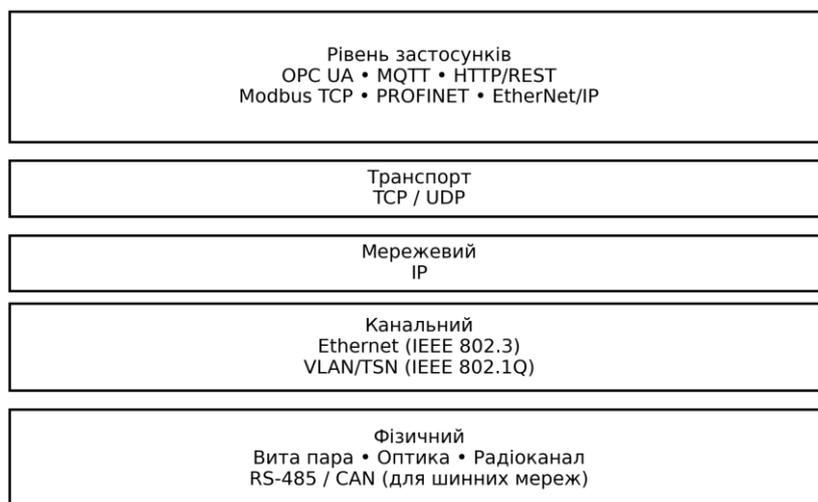


Рис. 18.1 – Узагальнений стек протоколів для технологічних мереж

Таблиця 18.1

Коротке порівняння протоколів

Протокол	Клас	Середовище	Застосування (узагальнено)
Modbus RTU	Польова шина	RS-485	Простий запит-відповідь; опитування датчиків та I/O.
CANopen	Польова шина	CAN	Приводи й мобільні машини; профілі пристроїв; детермінований арбітраж.
PROFINET	Industrial Ethernet	Ethernet	Реальний час; діагностика; віддалені I/O; кільця.
EtherNet/IP	Industrial Ethernet	Ethernet	СІР-модель; приводи/роботи; UDP/TCP обмін.
OPC UA	Інтеграція	IP-мережі	Семантика даних; безпека; SCADA–MES–ERP інтеграція.
IEC 61850	Енергетика	Ethernet	GOOSE/SV; моделі підстанції; швидкі події, цифрові вибірки.

Маршрут даних формують також віддалені модулі I/O, керовані комутатори Industrial Ethernet, шлюзи та конвертери інтерфейсів (RS-485↔Ethernet, HART-мультиплексори), медіаконвертери мідь/оптика, точки доступу Wi-Fi/LoRa/5G. Критичні сервіси: синхронізація часу, керування адресацією, моніторинг якості каналу, журналювання та сегментація мережі. Для надійності застосовують резервування, кільця та розділення трафіку керування і діагностики.

Резервування реалізують як на рівні фізики (подвійні лінії, незалежні траси), так і на рівні топології та протоколів (кільцеве відновлення, дублювання шляхів, паралельні мережі). При оцінюванні резервування важливо враховувати час перемикання: для подій захисту допустимі мілісекундні інтервали, тоді як для повільних технологічних параметрів — десятки або сотні мілісекунд. Окремо планують домени широкомовного трафіку, адресацію та пріоритети, щоб аварійні події не блокували циклічні дані керування.

Інтеграція з корпоративними мережами та ІоТ підвищує вимоги до безпеки: застосовують сегментацію (зони/кондуїти), DMZ, контроль доступу, керування обліковими записами і сертифікатами, журналювання та аналіз подій, а також захищені профілі протоколів (шифрування, автентифікація, контроль цілісності). Практично важливо поєднувати мережеві заходи із системною надійністю: оновлення ПЗ, резервне копіювання конфігурацій, контроль сумісності та процедурне управління змінами.

Перевірка проєкту включає оцінювання завантаження каналів, затримок і джитера, запасу пропускнуої здатності та сценаріїв відмов. Раціональне поєднання польових шин, Industrial Ethernet і протоколів інтеграції забезпечує керованість, прозору діагностику та масштабованість сучасних систем автоматизації; ключовою умовою є системний підхід, де мережа розглядається разом із часовою синхронізацією, резервуванням та кіберзахистом.

ЛЕКЦІЯ 19. АВТОМАТИЗАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ І ПІДСТАНЦІЙ. ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Автоматизація електричних станцій і підстанцій є комплексом технічних і програмних засобів, що забезпечують керування комутаційними апаратами, збір телеметрії, реалізацію релейного захисту й автоматики, реєстрацію аварійних процесів, облік та інтеграцію з диспетчерськими системами. На відміну від «точкової» автоматики, підстанційна автоматизація є системою з чіткою структурою рівнів і функцій, де пристрої коміркового рівня (IED) взаємодіють зі станційним рівнем (сервери, НМІ, шлюзи), а польовий рівень утворюється датчиками, вимірювальними трансформаторами, приводами і вторинними колами. Ефективність такої системи визначається узгодженістю логіки, достовірністю сигналів і здатністю працювати у важких ЕМС-умовах, а також здатністю підтримувати стан-орієнтовану експлуатацію через архіви подій і тренди діагностики.

Функціонально підстанційна автоматизація включає підсистеми, які мають різні часові масштаби і різні «ціни помилок». Релейний захист працює в найжорсткіших часових рамках і має вимоги селективності та безвідмовності, тоді як телемеханіка і НМІ допускають більші затримки, але потребують високої достовірності підтвердження станів. Реєстрація подій і аварій потребує точного часу і достатньої частоти дискретизації, а облік — метрологічної точності та цілісності даних. Узагальнення ролей і типових засобів наведено в **табл. 19.1**, де показано, що одна й та сама фізична інфраструктура (мережа, час, живлення) підтримує різні функції, але вимоги до них відрізняються.

Таблиця 19.1

Підсистеми автоматизації станцій/підстанцій та інженерні вимоги

Підсистема	Типові засоби	Домінантні вимоги	Результат для експлуатації
РЗА	IED захисту, вимірювальні канали	мінімальний час, селективність, надійність	локалізація аварій, мінімізація наслідків
Керування комутацією	IED керування, міжблокування, приводи	підтвердження станів, безпечна логіка	виключення помилкових перемикачів
Телемеханіка	RTU/шлюз, протоколи	достовірність ТС/ТУ, резервування	дистанційне керування і моніторинг
Реєстрація аварій	реєстратори, осцилографія IED	частота, точний час, архів	аналіз причин, відновлення
Облік/якість	лічильники, PQ-аналіз	точність, методики, захист даних	комерційні розрахунки, контроль PQ
Діагностика стану	датчики, сервер трендів	довготривала стабільність, аналітика	прогнозне обслуговування

Автоматизація промислових підприємств, зокрема енергомістких виробництв, концептуально подібна, але має відмінність у домінуванні технологічних контурів: керування двигунами, приводами, печами, насосними станціями, системами вентиляції й охолодження, а також інтеграція з системами виробничого управління. Тут ПЛК та частотні перетворювачі є центральними виконавчими засобами, а SCADA забезпечує диспетчеризацію технологічних параметрів. Водночас промислова енергетика (власні підстанції підприємства) інтегрує підстанційну автоматику з технологічною, формуючи єдиний інформаційний простір, де енергетичні вимірювання (I, U, P, Q) пов'язуються з режимами навантажень і керуванням технологічними агрегатами. Узагальнену інтеграцію «підстанція–цех» подано на **рис. 19.1**, де підстанційний комплекс і технологічний комплекс взаємодіють через шлюз/сервер інтеграції, який виконує мапінг даних IEC 61850 (об'єкти IED) у теги SCADA/DCS/PLC, а також забезпечує розділення мереж (substation network ↔ plant bus) і керований доступ до команд/подій. Приклад такої інтеграції наведено на рис. 19.2 (Station Gateway між IEC 61850-мережею підстанції та технологічною мережею АСУ ТП).

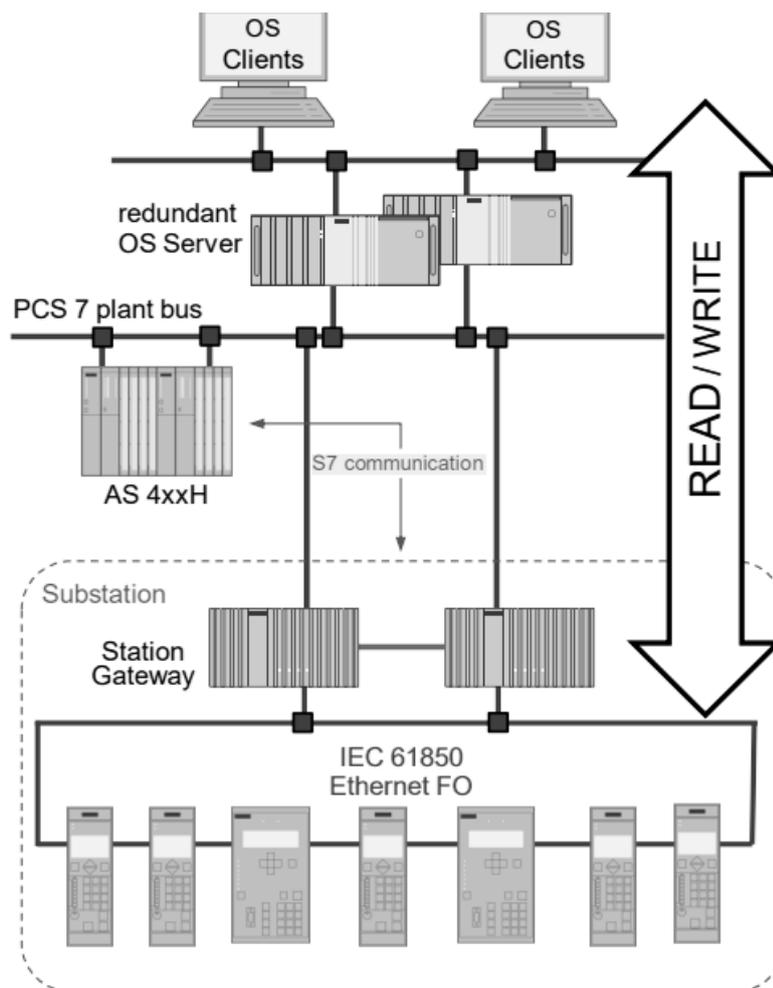


Рис. 19.1 - Приклад інтеграції підстанційної IEC 61850-мережі (IED/захист) з технологічною АСУ ТП (PCS 7 plant bus) через Station Gateway

На практиці інтеграція включає передавання подій/повідомлень із часовими мітками, циклічних вимірювань і дискретних команд із міжблокуваннями, причому часові характеристики та політики доступу задаються інженерно на межі енергетичного й технологічного доменів.

ЛЕКЦІЯ 20. ВІДНОВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В УМОВАХ ВОЄННИХ ДІЙ

В умовах воєнних дій енергетична інфраструктура стає однією з головних цілей атак. Руйнуються високовольтні лінії електропередач, трансформаторні підстанції, розподільчі пункти.

Втрата цілісності мережі призводить до масштабних відключень, зниження стабільності енергосистеми, виникнення каскадних аварій. Критичні об'єкти залишаються без живлення.

Технічні виклики :

- Відсутність резервних шляхів передачі енергії.
- Пошкодження обладнання, яке потребує тривалого ремонту або заміни.
- Нестабільність параметрів (напруга, частота).

Автоматизовані системи дозволяють швидко локалізувати пошкодження, відключати аварійні ділянки та перепідключати споживачів до резервних джерел. Прикладом може слугувати використання мобільних підстанцій, автоматичного введення резерву (АВР), дистанційного керування вимикачами та реклоузерами для мінімізації часу відновлення.

Лікарні, військові частини та комунальні служби забезпечують життєдіяльність населення і обороноздатність держави. Їхня безперервна робота залежить від стабільного електропостачання.

Руйнування цілісності енергосистеми становить критичну загрозу національній безпеці, провокуючи каскад ризиків, що охоплюють соціальну, медичну та оборонну сфери. Найбільш гострою проблемою є дестабілізація життєзабезпечення медичних установ, де раптове припинення електропостачання блокує роботу апаратів штучної вентиляції легень та операційних систем, безпосередньо загрожуючи життю пацієнтів. Паралельно з цим виникає колапс цивільної інфраструктури: припиняється функціонування водоканалів, тепломереж та транспортних вузлів, що в поєднанні з відсутністю освітлення та вентиляції створює передумови для гуманітарної катастрофи. У військовому секторі дефіцит енергії призводить до розриву каналів зв'язку та деградації систем управління, що є неприпустимим в умовах ведення бойових дій. Ситуація ускладнюється технічними чинниками — нестабільністю навантажень, частотними перепадами напруги та обмеженим доступом ремонтних бригад до пошкоджених ділянок через дефіцит ресурсів.

Впровадження засобів автоматизації виступає ключовим інструментом мінімізації зазначених ризиків та забезпечення стійкості (resilience) енергосистеми. Стратегічно важливим є перехід до концепції мікромереж (microgrids), які дозволяють об'єктам функціонувати в автономному режимі незалежно від стану центральної мережі. Технологічна інтеграція систем дистанційного моніторингу та управління мобільними генераторами дозволяє оперативно перерозподіляти потужності в умовах дефіциту. При цьому

автоматизація забезпечує високу швидкість реагування, що є критичним для мінімізації соціальних та економічних наслідків аварійних ситуацій.

Практична реалізація заходів щодо зниження ризиків базується на створенні багаторівневих систем резервування. Для лікарень та військових командних пунктів пріоритетним є встановлення автоматизованих дизель-генераторів та систем АВР (автоматичне введення резерву), що гарантують безперебійне живлення в мілісекундному діапазоні перемикання. Крім того, застосування спеціалізованих систем диспетчерського управління та збору даних (SCADA) дозволяє здійснювати прецизійний контроль за функціонуванням комунальних служб у кризових умовах, забезпечуючи стабільну роботу критичної інфраструктури навіть за умов часткової руйнації енергомережі.



а)



б)

Рис. 20.1 - Кадри зруйнованого обладнання електроенергетичної системи України, внаслідок війни росії проти України

Сучасна парадигма енергозабезпечення в польових та екстремальних умовах базується на використанні автономних генеруючих установок з високим ступенем мобільності. До ключових технічних рішень належать дизель-генераторні установки (ДГУ) з інтегрованими системами автоматичного пуску, що мінімізують час розгортання мережі. Більш складні завдання вирішуються за допомогою мобільних енергетичних комплексів у контейнерному виконанні, які являють собою повнофункціональні підстанції, адаптовані до швидкого транспортування. Перспективним напрямом є впровадження гібридних систем, що поєднують традиційну генерацію з відновлюваними джерелами енергії (фотоелектричними панелями та мікро-вітротурбінами), що дозволяє оптимізувати витрати палива та підвищити автономність об'єктів.

Автоматичне введення резерву (АВР) розглядається як критичний вузол автоматизації, призначений для підтримання живучості енергосистеми у разі відмови основного джерела живлення. Функціональний алгоритм АВР базується на безперервному прецизійному моніторингу електротехнічних параметрів основної лінії, зокрема рівнів напруги, частоти та фазних струмів.

При ідентифікації аварійного стану або повної втрати живлення інтелектуальна система керування ініціює миттєве перемикання на резервне джерело (акумуляторні блоки, генератори або альтернативні лінії). Впровадження технології АВР забезпечує низку стратегічних переваг:

- Мінімізація часових інтервалів відключення, що є критичним для систем реального часу;
- Гарантований захист критичної інфраструктури від дестабілізації технологічних процесів;
- Виключення людського фактора завдяки повній автономності алгоритмів прийняття рішень;
- Експоненціальне підвищення загального коефіцієнта надійності складних енергетичних вузлів.

Таблиця 20.1

Порівняльна характеристика основних типів систем АВР

Характеристика	АВР на базі контакторів (релейна логіка)	АВР на базі мотор-приводів (автоматичних вимикачів)	Інтелектуальні АВР (на базі програмованих контролерів)
Час спрацювання	Мінімальний (до 20–50 мс)	Середній (100–500 мс)	Настроюваний (висока точність)
Складність алгоритмів	Тільки базові (увімк./вимк.)	Середні (захист від струмів КЗ)	Висока (аналіз якості мережі, диспетчеризація)
Моніторинг параметрів	Відсутній або мінімальний	Механічний стан привода	Повний (U, I, f, cos φ, гармоніки)

Комунікаційні можливості	Відсутні	Дискретні сигнали стану	Інтеграція в SCADA (Modbus, Profibus)
Галузь застосування	Побутові та малі комерційні об'єкти	Потужні силові щити (промисловість)	Критична інфраструктура, Microgrids, IT-центри
Надійність	Висока (проста конструкція)	Висока (захист силових ланцюгів)	Найвища (самодіагностика та логування подій)

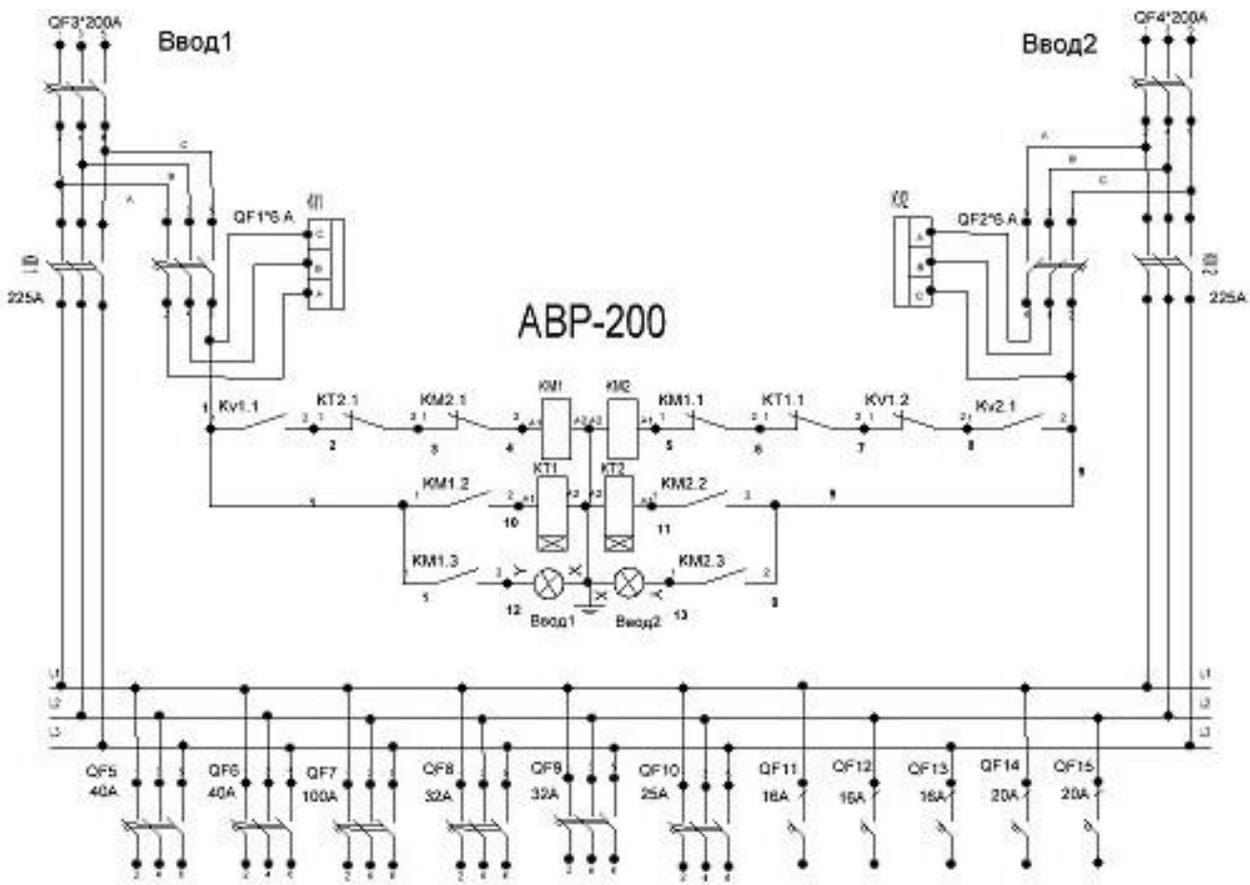


Рис. 4.2. – Типова схема АВР

20.1 Використання інтелектуальних вимикачів та реклоузерів

Інтелектуальних вимикачів та реклоузерів - це сучасні комутаційні апарати, які забезпечують автоматичне відключення та повторне включення ліній у разі аварійних ситуацій. Вони підвищують надійність мережі та зменшують час простою.

Типові функції інтелектуальних вимикачів та реклоузерів

- Постійний моніторинг параметрів лінії (струм, напруга).
- Автоматичне відключення при короткому замиканні чи перевантаженні.
- Спроба повторного включення (реклоузер) для ліквідації тимчасових пошкоджень.
- Передача даних у систему SCADA для централізованого контролю.

Таким чином сучасні інтелектуальні вимикачі та енклоузери можуть розглядатися як елементи SCADA систем в електроенергетиці.

20.2 Приклади практичного застосування при відновленні електропостачання у містах України після атак на енергосистему

- Кризове управління та пріоритети
Після масованих атак оперативно створюються штаби, які координують дії «Укренерго», місцевої влади та силових структур. У перші години після ударів головний пріоритет — забезпечити живлення критичної інфраструктури (лікарні, водоканали, військові частини) .
- Мобільні джерела живлення
Використовуються дизель-генератори та мобільні котельні для підтримки роботи лікарень і комунальних служб. У багатьох випадках застосовувалася розподілена генерація — від сонячних панелей до локальних міні-електростанцій .
- Ремонт та заміна обладнання
Енергетики відновлюють трансформатори та високовольтні лінії, часто під обстрілами. Використовуються заздалегідь підготовлені комплекти обладнання для швидкої заміни пошкоджених елементів .
- Автоматизація та дистанційне керування
SCADA-системи та інтелектуальні вимикачі допомагають швидко локалізувати аварійні ділянки та перепідключати споживачів. Це зменшує час відновлення та дозволяє працювати навіть при обмеженому доступі до об'єктів.
- Міжнародна підтримка
Україна отримує допомогу від партнерів — постачання обладнання, трансформаторів, мобільних генераторів. Це дозволяє скоротити терміни ремонту та стабілізувати енергосистему після масованих атак .

Практичне відновлення електропостачання в Україні базується на поєднанні мобільних джерел живлення, автоматизації, швидкого ремонту та міжнародної підтримки.