

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»

**М. В. Лукінюк**

# **КОНТРОЛЬ І КЕРУВАННЯ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

Рекомендовано Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України  
як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів,  
які навчаються за напрямом «Хімічна технологія та інженерія»

**Книга 2**

**Керування хіміко-технологічними процесами**

Київ  
«Політехніка»  
2012

УДК 66.012-52(075.8)

ББК 35.11я73

Л84

*Гриф надано Міністерством освіти  
і науки, молоді та спорту України  
(Лист № 1/1-12610 від 29.12.2011 р.)*

Рецензенти:

*В. М. Казак*, д-р техн. наук, проф.,  
Національний авіаційний університет

*Ю. К. Тодорцев*, д-р техн. наук, проф.,  
Одеський національний технічний університет

Відповідальний редактор

*А. І. Жученко*, д-р техн. наук, проф.,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»

**Лукінюк М. В.**

Л84 Контроль і керування хіміко-технологічними процесами: У 2 кн. Кн. 2. Керування хіміко-технологічними процесами [Текст] : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом: «Хімічна технологія та інженерія» / М. В. Лукінюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 336 с. : іл. – Біблігр.: с. 328–330. – 300 пр.

**ISBN 978-966-622-520-0.**

**ISBN 978-966-622-531-6 (Кн. 2)**

Висвітлено основи теорії автоматичного керування, зокрема розглянуто алгоритми та об'єкти керування, методи моделювання систем керування, проблеми стійкості та якості систем автоматичного керування, описано технічні засоби впливу на технологічні процеси, режими використання ЕОМ у системах керування та пристрої сполучення ЕОМ з об'єктами керування, розібрано особливості використання цифрової та мікропроцесорної техніки у системах автоматичного контролю та керування. Показано особливості розроблення схем автоматизації на основі оновленої регламентної бази (українські та міждержавні стандарти), проілюстровані численними прикладами схем автоматичного контролю, сигналізації та регулювання технологічних параметрів з різними варіантами їх технічної реалізації на основі сучасних аналогових і цифрових засобів автоматизації, а також мікропроцесорної техніки. Наведено приклади розроблення та опису схем автоматизації різних хіміко-технологічних процесів.

Для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом «Хімічна технологія та інженерія».

**УДК 66.012-52(075.8)**

**ББК 35.11я73**

ISBN 978-966-622-520-0.

ISBN 978-966-622-531-6 (Кн. 2)

© М. В. Лукінюк, 2012

## Список прийнятих скорочень і позначень

АВС – азотоводнева суміш  
АБД – апарат безперервної дії  
АПД – апарат періодичної дії  
АСК – автоматизована система керування  
АСК ТП – автоматизована система керування технологічними процесами  
АСНД – автоматизована система наукових досліджень  
АФ – аналоговий фільтр  
АЦП – аналого-цифровий перетворювач  
ВІС – велика інтегральна схема  
ВМ – виконавчий механізм  
ДСАК – дискретна система автоматичного керування  
ДСАР – дискретна система автоматичного регулювання  
ДФ – дискретний фільтр  
Е – екстраполятор  
ЕНП – екстраполятор нульового порядку  
ЕОМ – електронна обчислювальна машина  
ЕП – елемент порівняння  
ЕПП – електропневматичний перетворювач  
ЗВТ – засіб вимірювальної техніки  
ЗЗ – зворотний зв'язок  
ЗЗП – зовнішній запам'ятовувальний пристрій  
ЗКК – зворотний каталізаторний комплекс  
ЗНЧ – зведена неперервна частина  
ЗП – задавальний пристрій  
ІВК – інформаційно-вимірювальний комплекс  
ІЕ – імпульсний елемент  
КЕ – кодувальний елемент  
КЕОМ – керувальна електронна обчислювальна машина  
КК – критерій керування  
КМЕОМ – керувальна мікроелектронна обчислювальна машина  
КН – коректор нуля  
КОК – керувальний обчислювальний комплекс  
ЛАЧХ – логарифмічна амплітудно-частотна характеристика  
ЛФЧХ – логарифмічна фазочастотна характеристика  
ММЕОМ – мікро- або міні-ЕОМ  
МП – мікропроцесор  
МПС – мікропроцесорна система  
МЦП – модуль центрального процесора  
НЕ – нелінійний елемент  
НП – нормувальний перетворювач  
НЧС – неперервна частина системи

ОЗП – оперативний запам'ятовувальний пристрій  
ОК – об'єкт керування; обмотка керування  
ОКП – об'ємна концентрація пігментів  
ОС – операційна система  
ПАБ – поліалкілбензол  
ПАЗ – протиаварійний захист  
ПВ – пристрій виведення  
ПВВ – пристрій введення  
ПВП – первинний вимірювальний перетворювач  
ПЕП – пневмоелектричний перетворювач  
ПЗ – програмне забезпечення  
ПЗЗ – пристрій зворотного зв'язку  
ПЗО – пристрій зв'язку з об'єктом  
ПЗП – постійний запам'ятовувальний пристрій  
ПК – пристрій керування  
ПЛК – програмований логічний контролер  
ПОТ – пульт оператора-технолога  
ППФ – пропан-пропіленова фракція  
ПСАК – підсистема автоматичного керування  
ПЦК – пряме цифрове керування  
РД – реверсивний двигун  
РО – регульовальний орган  
РП – реостатний перетворювач  
САД – система автоматичного дозування  
САК – система автоматичного керування  
САПР – система автоматизованого проектування  
САР – система автоматичного регулювання  
СК – система керування  
СКВ – середньоквадратичне відхилення  
СКК – свіжий каталізаторний комплекс  
ТП – технологічний процес  
ТЧП – температурно-часова програма  
ТОК – технологічний об'єкт керування  
ФЧХ – фазочастотна характеристика  
ХТП – хіміко-технологічний процес  
ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач  
ЦВП – цифровий вимірювальний прилад  
ЦОМ – цифрова обчислювальна машина  
ЦОТ – цифрова обчислювальна техніка  
ЦСАК – цифрова система автоматичного керування  
ЦФ – цифровий фільтр  
ЧЕ – чутливий елемент

## Передмова

Упровадження автоматичного керування технологічними процесами приводить до збільшення кількості, поліпшення якості та зниження собівартості вироблюваної продукції. Це забезпечує зменшення витрат сировини й енергії, подовження термінів міжремонтного пробігу технологічного устаткування. Впровадження спеціальних автоматичних пристроїв сприяє безаварійній роботі устаткування, виключає випадки травматизму, попереджає забруднення довкілля промисловими відходами.

Проведення деяких сучасних технологічних процесів можливе тільки за умови їх повної автоматизації (наприклад, процеси, здійснювані на атомних установках і в парових котлах високого тиску, процеси дегідрування тощо). За ручного керування такими процесами найменше вагання людини, запізнитий її вплив на процес можуть спричинити серйозні наслідки.

Комплексна автоматизація процесів (апаратів) хімічної технології передбачає не тільки автоматичне забезпечення нормального перебігу цих процесів з використанням різних автоматичних пристроїв (контролю, регулювання, сигналізації тощо), але й автоматичне керування запуском і зупиненням апаратів для ремонтних робіт і в критичних ситуаціях.

За автоматизованого виробництва людина переключається на творчу роботу – аналізує результати керування, складання завдань і програм для автоматичних приладів, налагоджує складні автоматичні пристрої тощо. Для обслуговування агрегатів, оснащених складними системами автоматизації, потрібні фахівці з високим рівнем знань. З підвищенням кваліфікації та культурного рівня працівників стирається межа між фізичною та розумовою працею.

Розвиток обчислювальної техніки посприяв автоматизації керування через застосування електронних обчислювальних машин (ЕОМ) і мікропроцесорів (МП) безпосередньо в технологічних процесах. Коли в системах керування стали широко використовувати керувальні ЕОМ (КЕОМ), ще більше зросла значущість вимірювань, оскільки, попри свої величезні технічні можливості, без повної інформації про стан об'єкта керування (ОК) ЕОМ не здатні забезпечити ефективного керування об'єктом (надалі під цим терміном розумітимемо технологічний процес і устаткування, в якому він відбувається). Це ознаменувало новий етап розвитку автоматизації, характерною ознакою якого для безперервних технологічних процесів став перехід до оптимального керування ними.

Нагальною потребою стало збільшення швидкодії, точності та надійності засобів аналітичної техніки, оскільки вказані характеристики сучасних засобів аналітичної техніки ще в багатьох випадках не відповідають вимогам автоматизованого керування технологічними процесами. Цим пояснюється суперечність між майже необмеженими можливостями ЕОМ

у сфері обробки інформації та керування й доволі обмеженими можливостями отримання початкової інформації про якість сировини і продукції та перебіг хіміко-технологічних процесів.

Важливим етапом створення ефективної системи керування є обрання керованих (регульованих) параметрів та керувальних (регульовальних) впливів. Обрання керованих параметрів залежить від особливостей перебігу контрольованого процесу, точності та надійності, з якою можуть бути отримані та передані показання датчиків цього параметра, а також обраного регульовального впливу. Найчастіше керувальними параметрами в (хіміко-технологічних процесах) ХТП є температура, тиск, концентрація реагентів або продуктів процесу, витрата реагентів і тепла холодоагентів. Для підвищення надійності керування процесом кількість контрольованих і керованих параметрів у кожному ХТП має бути мінімально потрібною.

Системи автоматичного керування також забезпечують оповіщення персоналу про відхилення режимних параметрів технологічного процесу за допустимі межі, дають змогу вчасно виявляти аварійні ситуації й автоматично вживати оперативних заходів для запобігання аваріям, пожежам, вибухам, виходу з ладу устаткування, відвертають неприпустимі та помилкові дії оперативного персоналу, здійснюють технічне діагностування, що надає інформацію про несправності та пошкодження устаткування і технічних засобів атоматизації, на підставі якої виявляють місця ушкоджень і встановлюють причини несправностей тощо.

Навчальний посібник написано на основі курсів «Автоматизація хімічних виробництв» і «Контроль та керування хіміко-технологічними процесами», які автор багато років викладає студентам інженерно-хімічного та хіміко-технологічного факультетів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

Автор щиро вдячний професору А. І. Кубраку за допомогу в підготовці матеріалу до розділу «Основи теорії автоматичного керування», професору М. З. Кваску за допомогу в підготовці матеріалу до розділу «Цифрові системи автоматичного керування технологічними процесами», а також доценту В. М. Ковалевському за поради та цінні зауваження до розділу «Технічні засоби впливу на технологічні процеси».

# 1. ОСНОВИ ТЕОРІЇ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

За практичної реалізації автоматичних систем керування зазвичай використовують принцип керування за відхиленням, згідно з яким відхилення  $\varepsilon$  регульованої величини  $y$  від її заданого значення  $y_{зд}$  регулятором  $P$  перетворюється у регулювальний вплив  $\mu$  на об'єкт керування ОК (зміщенням виконавчим механізмом ВМ робочого елемента регулювального органа РО), в результаті чого регульована величина  $y$  змінюється так, щоб її відхилення  $\varepsilon = y_{зд} - y$  зменшувалось до прийняттого або до нульового значення (більш детально про головні принципи керування – див. п. 3). Спрощену структурну схему такої системи керування зображено на рис. 1.1.

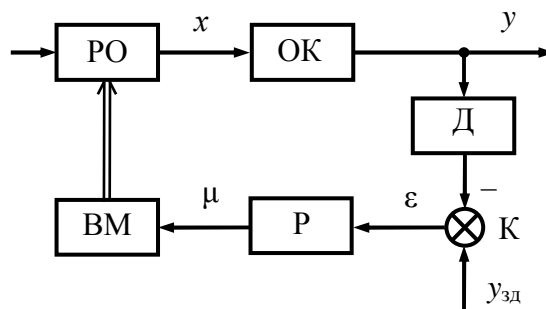


Рис. 1.1. Структурна схема системи автоматичного керування:  
РО – регулювальний орган; ОК – об'єкт керування; Д – датчик;  
К – компаратор; P – регулятор; ВМ – виконавчий механізм

Подекуди елементів, показаних на схемі, може не бути або ж вони можуть об'єднуватись із сусідніми. Також можуть додаватись нові, як наприклад, узгоджувальні перетворювачі, підсилювачі, лінії передавання сигналів тощо. Однак принципове те, що елементи такої системи автоматичного керування завжди утворюють замкнений контур циркуляції сигналу.

Як уже зазначалося, такі системи ще називають системами зі зворотним зв'язком, причому зв'язок може бути як додатним, так і від'ємним. Властивості такої великої системи не обмежуються лише властивостями її складових. Теорія автоматичного керування займається саме прогнозуванням поведінки замкнених систем керування та вивченням засобів впливу на цю поведінку.

## 1.1. СПОСОБИ ЗАДАВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТА СИСТЕМ У ЦІЛОМУ

У теорії автоматичного керування оперують математичними моделями досліджуваних систем. Окрім математичних моделей, розрізняють *матеріальні*, тобто виконані у вигляді певних фізичних об'єктів, які виконують функції моделей, та *уявні*, до яких, зокрема, належать *образно-знакові*

(частково формалізовані об'єкти, що використовують різні умовні позначення, а для отримання уявлення про сам об'єкт потрібно долучити уяву людини; приклади: топографічні карти, креслення деталей і пристроїв, схеми технологічних процесів тощо) та *знакові* або *математичні* – це вже цілком формалізовані моделі, виражені математичними залежностями, формулами, алгоритмами, графіками. У разі їх застосування немає потреби оперувати уявою: вони несуть інформацію про кількісні взаємозв'язки в об'єкті моделювання, однак уявлення про зовнішній вигляд об'єкта, його колір, вагу тощо – не дають.

Для створення математичних моделей використовують фундаментальні закони електротехніки, гідравліки, теплопередачі, хімічної кінетики тощо, які, до речі, самі є математичними моделями відповідних фізичних явищ. Найбільшого поширення математичне моделювання набуло з розвитком обчислювальної техніки.

Порівняно з фізичними моделями, під час створення яких доводиться відтворювати – хай і в спрощеному вигляді – складні фізичні процеси (хімічні реакції, потоки рідин і газів, явища тепло- та масопередачі тощо), математичні моделі більш універсальні, дешеві, зручні у використанні та безпечні. Дослідження математичних моделей на ЕОМ дає змогу суттєво заощадити час.

Почнемо з моделей окремих елементів систем керування. Під математичною моделлю розумітимемо зв'язок між зовнішнім впливом та параметрами стану досліджуваного елемента (наприклад, об'єкта керування). Тобто, це інформаційна модель. Зовнішні впливи (збурення, регулювальні впливи тощо) розглядають як вхідні сигнали – *входи*, тоді як параметри стану досліджуваного елемента (тиск, рівень, температура тощо) надалі будемо називати *виходами*. Вхідів–виходів у об'єкті (елементі) може бути по декілька.

Наявність зв'язку між заданим входом і певним виходом розглядають як наявність *каналу передачі сигналу* від певного входу до відповідного виходу. Далі мова йтиме переважно про канали, задіяні у досліджуваній системі. Властивості каналу визначаються його статичними та динамічними характеристиками. Відповідно, розрізняють статичний і динамічний стани (режими) каналу. Статичний режим – це режим, за якого вхід і відповідний йому вихід залишаються незмінними впродовж необмежено довгого часу (такий режим ще називають усталеним). Залежність виходу від входу в усталеному режимі називають *статичною характеристикою* (рис. 1.2).

У загальному випадку це певна крива, тобто, характеристика може бути і нелінійною, причому способів реалізувати нелінійну залежність існує безліч (через дві точки на площині можна провести безліч кривих). У автоматичці прийнято вести відлік змінних не від їх абсолютних нулів (до речі, абсолютних нулів не так уже й багато в природі – згадайте, наприклад, що таке нуль температури за шкалами Фаренгейта, Реомюра, Цельсія та Кельвіна), а від



рівня, що відповідає ustalеному значенню змінної, прийнятому за базове – як, наприклад, надлишковий тиск відраховують від атмосферного.

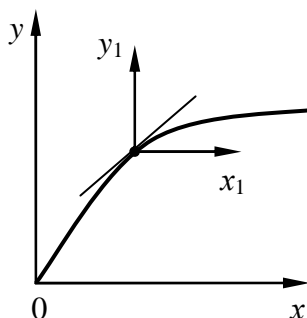


Рис. 1.2. Приклад статичної характеристики каналу

Якщо, наприклад, регульоване (задане) значення температури в якомусь апараті, скажімо, дорівнює 120 °С, то за реальної температури 123 °С матимемо відхилення (приріст відносно температури 120 °С), що дорівнює плюс 3 °С, а за температури 118 °С – мінус 2 °С. Перехід від «абсолютних» значень температури до її приростів зводиться до перенесення початку координат у відповідну точку статичної характеристики. Сам же вигляд характеристики не змінюється, але при цьому з'являється можливість лінеаризувати статичну характеристику в околі цього ustalеного режиму. За умови, що відхилення від ustalеного режиму очікується незначне (а системи автоматичного керування створюються заради мінімізації відхилень керованих параметрів від заданого режиму), можна замінити справжню статичну характеристику її лінеаризованим еквівалентом

$$y = kx,$$

де  $k$  – коефіцієнт передачі каналу.

Очевидно, що коли реальна характеристика нелінійна, то для різних ustalених режимів  $k$  буде різним.

Втім, ustalений режим для автоматичних систем керування – це, радше, ідеал. На практиці система весь (або майже весь) час перебуває в русі через те, що на неї впливають зовнішні чинники (збурення), та й регулятор час від часу «сіпає» підопічний об'єкт. Коли б не було збурень, то й регулятор не знадобився б. Але нормальний режим роботи автоматичної системи – це рух, або, принаймні, готовність до руху, тому сподіватися, що й без регулювання вихідний параметр об'єкта (наприклад, та сама температура) весь час залишатиметься незмінним та ще й дорівнюватиме заданому значенню, не доводиться.

Щоб аналізувати особливості руху системи, потрібна математична модель її динаміки. Є багато способів задавати динамічну модель: система диференціальних рівнянь або диференціальне рівняння виділеного каналу, передавальна функція, перехідна або імпульсна характеристики, частотні характеристики тощо.

Зазвичай системи диференціальних рівнянь – результат аналітичного моделювання процесів, які відбуваються у досліджуваному об’єкті. Диференціальне рівняння окремого каналу може бути отримано як з аналітичної моделі, так і обробленням отриманих експериментальних даних. Найчастіше експериментально отримують *криву розгону*. Це реакція каналу на ступінчастий вхідний сигнал (рис. 1.3, а, б).

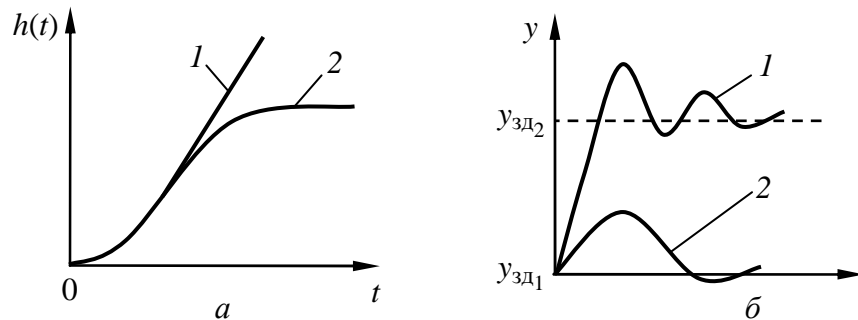


Рис. 1.3. Перехідні характеристики: а – об’єктів керування без самовирівнювання (1) і з самовирівнюванням (2); б – системи керування у каналах керування (1) і збурення (2)

Перехідний процес  $y = h(t)$  системи керування за нульових початкових умов і подавання на її вхід одиничної ступінчастої функції

$$1(t) = \begin{cases} 0 & \text{за } t \leq 0; \\ 1 & \text{за } t > 0, \end{cases}$$

називається *перехідною функцією* (*перехідною характеристикою*), тобто

$$h(t) = y(t) \Big|_{\substack{y_0^{(i)} = 0; \\ x = 1(t)}; 1 \leq i \leq n.$$

Характерна ознака більшості елементів автоматичних систем – їх інерційність. Цей термін означає, що вихід об’єкта реагує на зміну входу не миттєво, – його реакція є функцією часу (наприклад, як показано на рис. 1.3, а). Якщо перехідна характеристика протягом скінченного часу не виходить на новий усталений рівень, то вважають, що об’єкт не має самовирівнювання (крива 1), в іншому разі – об’єкт має самовирівнювання (крива 2).

Є добре відпрацьовані алгоритми, як майже будь-якій перехідній характеристиці (із самовирівнюванням чи без нього) поставити у відповідність передавальну функцію, скажімо, такого вигляду:

$$W(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0}. \quad (1.1)$$

Як зазначалося (див. п. 2.2.3 Кн. 1), передавальна функція – це відношення зображення за Лапасом вихідного сигналу до зображення за

Лапласом вхідного сигналу за нульових початкових умов. Якщо взяти до уваги, що відповідно до [10, 14, 16, 22]

$$L[1(t)] = \frac{1}{p},$$

то з визначення  $W(p)$  випливає:

$$L[h(t)] = \frac{W(p)}{p}.$$

Що ж стосується нульових початкових умов, то по відношенню до функції (1.1) вони виглядають так:

$$y|_{t=0} = 0; \left. \frac{dy(t)}{dt} \right|_{t=0} = 0; \left. \frac{d^2 y(t)}{dt^2} \right|_{t=0} = 0; \dots; \left. \frac{d^{(n-1)} y(t)}{dt^{(n-1)}} \right|_{t=0} = 0.$$

Це, фактично, попередній (перед подачею на вхід сигналу  $x = 1(t)$ ) усталений стан каналу, а про  $y|_{t=0} = 0$  вже йшлося (відлік від усталеного значення, тобто останнє беремо за нуль відліку). А те, що у статичному режимі похідні за часом дорівнюють нулю, очевидно.

*Імпульсна характеристика*  $g(t)$  – реакція каналу на одиничний імпульс  $\delta(t)$  нескінченно великої амплітуди з нескінченно малою тривалістю за нульових початкових умов:

$$\delta(t) = \begin{cases} 0 & \text{за } t \neq 0; \\ \infty & \text{за } t = 0, \end{cases}$$

$\delta(t)$  називають дельта-функцією або функцією Дірака.

Інтеграл від  $\delta$ -функції в межах інтервалу  $-\infty \dots \infty$  за визначенням дорівнює одиниці:  $\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1$ . Між одиничною ступінчастою функцією та

$\delta$ -функцією є зв'язок:  $\delta(t) = \frac{d}{dx} 1(t)$ , тому  $L[\delta(t)] = 1$ .

Можна показати, що

$$L[g(t)] = W(p);$$

$$h(t) = \int_0^t \delta(t) dt$$

і відповідно

$$g(t) = \frac{d}{dt} [h(t)].$$

Кілька слів про частотні характеристики. Якщо на вхід лінійного елемента подавати досить довго гармонійний сигнал, наприклад, такий:

$$x(t) = A_{\text{вх}} \sin(\omega t),$$

то з часом (після згасання перехідних складових) на виході встановиться сигнал вигляду

$$y(t) = A_{\text{вих}} \sin(\omega t + \varphi),$$

де  $\omega$  – колова частота,  $\varphi(\omega)$  – зсув фази вихідного сигналу (гармоніки) відносно вхідної гармоніки. За різних частот  $\omega$  відношення  $A_{\text{вих}} / A_{\text{вх}}$  буде функцією частоти, так само як і  $\varphi$ .

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) – це  $A(\omega) = \frac{A_{\text{вих}}}{A_{\text{вх}}}(\omega)$ ,

фазо-частотна характеристика (ФЧХ) –  $\varphi(\omega)$ .

Амплітудно-фазовою характеристикою (АФХ)  $W(j\omega)$  називають характеристику вигляду

$$W(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)},$$

де  $j = \sqrt{-1}$  – уявна одиниця.

Можна показати, що  $W(j\omega) = W(p)|_{p=j\omega}$ .

Якщо поєднати полярну систему координат з комплексною площиною, то зв'язок між частотними характеристиками виглядатиме так, як показано на рис. 1.4.

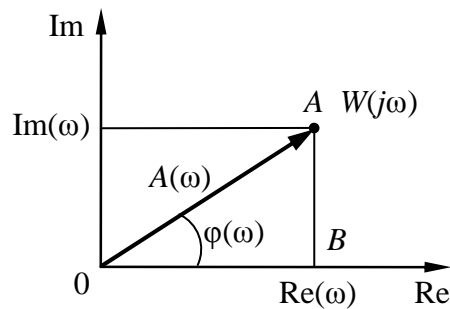


Рис. 1.4. Частотні характеристики та зв'язок між ними

Тут  $\text{Re}(\omega)$  – дійсно-частотна характеристика (проекція вектора  $W(j\omega)$  на дійсну вісь  $\text{Re}$  комплексної площини), а  $\text{Im}(\omega)$  – уявно-частотна характеристика (проекція вектора  $W(j\omega)$  на уявну вісь  $\text{Im}$  комплексної площини). Для прямокутного трикутника  $0AB$  очевидно, що

$$A(\omega) = \text{mod}[W(j\omega)]; \varphi(\omega) = \text{arg}[W(j\omega)];$$

$$\text{Re}(\omega) = \text{re}[W(j\omega)]; \text{Im}(\omega) = \text{im}[W(j\omega)];$$

$$W(j\omega) = \operatorname{Re}(\omega) + j \operatorname{Im}(\omega);$$

$$A(\omega) = \sqrt{\operatorname{Re}^2(\omega) + \operatorname{Im}^2(\omega)};$$

$$\varphi(\omega) = \begin{cases} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}(\omega)}{\operatorname{Re}(\omega)}, & \text{якщо } \operatorname{Re}(\omega) > 0; \\ \pi - \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}(\omega)}{\operatorname{Re}(\omega)}, & \text{якщо } \operatorname{Re}(\omega) < 0; \\ \pi, & \text{якщо } \operatorname{Re}(\omega) = 0, \operatorname{Im}(\omega) > 0; \\ -\pi, & \text{якщо } \operatorname{Re}(\omega) = 0, \operatorname{Im}(\omega) < 0. \end{cases}$$

З отриманих виразів видно, що різні способи задавання динамічних характеристик каналу взаємопов'язані, тому на практиці достатньо мати кілька таких виразів, а з них можна отримати будь-який інший. До того ж усі згадані перетворення елементарно програмуються і можуть виконуватися на сучасних комп'ютерах майже миттєво (як правило, за частки секунди). А виконувати серйозні розрахунки з динаміки систем не на сучасному комп'ютері – немає сенсу.

## 1.2. КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЗА ЇХ ДИНАМІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Точно кажучи, кожен елемент системи керування єдиний і неповторний, тому щоб зорієнтуватись їх класифікують за виглядом передавальної функції, наприклад, відносно виразу (1.1). Слід зазначити, що передавальні функції цього типу (дробово-раціональна, тобто у вигляді відношення поліномів від  $p$ ) мають не всі фізичні об'єкти (елементи) систем. Справа в тому, що є об'єкти із зосередженими параметрами (їх можна розглядати як такі, що мають скінченну, назагал  $n$ -ну, кількість акумулювальних ємностей – детальніше про них мова йтиме далі) та об'єкти з розподіленими параметрами, у яких параметри стану є не тільки функціями часу (у перехідних режимах), але і функціями просторових координат, тобто розподіленими в просторі – звідки й походить така назва.

Об'єкти із зосередженими параметрами описують саме дробово-раціональними передавальними функціями, тоді як в об'єктах із розподіленими параметрами передавальні функції виявляються трансцендентними, тобто неалгебричними (це, наприклад, показові, логарифмічні, тригонометричні функції тощо), працювати з якими важче, ніж із дробово-раціональними.

З огляду на це фахівці різних галузей пристосувались апроксимувати (наближено описувати, замінити) трансцендентні передавальні функції від-

повідними їм (із певним рівнем наближення) дробово-раціональними функціями. І те, що в недалеку «докомп'ютерну» епоху (якихось 15–20 років тому) було практично нездійсненним (наприклад, інтегрувати диференціальне рівняння високого порядку, а тим паче диференціальні рівняння в частинних похідних для елементів з розподіленими параметрами) нині стало не тільки доступним, але навіть тривіальним.

Розглянемо прояви динамічних властивостей деяких найпростіших динамічних елементів (надалі будемо називати їх *елементарними динамічними ланками*) як реакцію цих пристроїв на стрибкоподібну зміну вхідної величини у вигляді одиничної східчастої функції  $x_0 = 1(t)$  (рис. 1.5, *а*).

Безінерційна ланка має такі динамічні характеристики:

$$W(p) = k; \quad h(t) = k \cdot 1(t);$$

$$W(j\omega) = k; \quad A(\omega) = k; \quad \varphi(\omega) = 0;$$

$$\operatorname{Re}(\omega) = k; \quad \operatorname{Im}(\omega) = 0.$$

Графічний вигляд динамічних характеристик безінерційної ланки показано на рис. 1.5, *б*, *в*. Для визначення коефіцієнта  $k$  (для засобів вимірювання – це коефіцієнт перетворення) достатньо обрахувати відношення відповідних приростів:  $k = \Delta y / \Delta x$ .

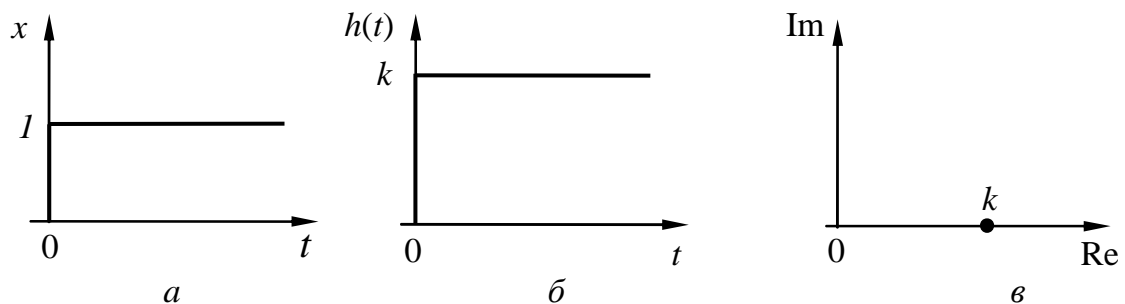


Рис. 1.5. Графічні зображення: *а* – одиничної східчастої зміни вхідної величини; *б*, *в* – динамічних характеристик безінерційної ланки: перехідної (*б*) та амплітудно-фазової (*в*)

Інтегральна ланка (рис. 1.6):

$$W(p) = \frac{k}{p}; \quad h(t) = kt \cdot 1(t);$$

$$W(j\omega) = -j \frac{k}{\omega}; \quad A(\omega) = \frac{k}{\omega}; \quad \varphi(\omega) = -\frac{\pi}{2};$$

$$\operatorname{Re}(\omega) = 0; \quad \operatorname{Im}(\omega) = -\frac{k}{\omega}.$$

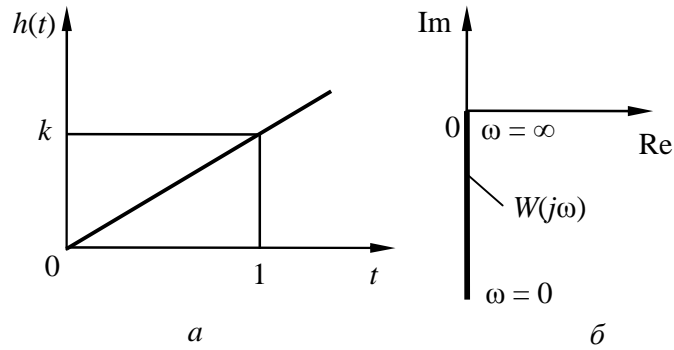


Рис. 1.6. Динамічні характеристики інтегральної ланки:  
*a* – перехідна; *б* – амплітудно-фазова

Ідеальна диференціальна ланка (рис. 1.7):

$$W(p) = kp; \quad h(t) = k\delta(t);$$

$$W(j\omega) = jk\omega; \quad A(\omega) = k\omega; \quad \varphi(\omega) = \frac{\pi}{2};$$

$$\operatorname{Re}(\omega) = 0; \quad \operatorname{Im}(\omega) = k\omega.$$

Коефіцієнти  $k$  можна визначити як площу під графіком перехідної характеристики (рис. 1.7, *a*) або як  $k = A(\omega) / \omega$  для будь-якої частоти.

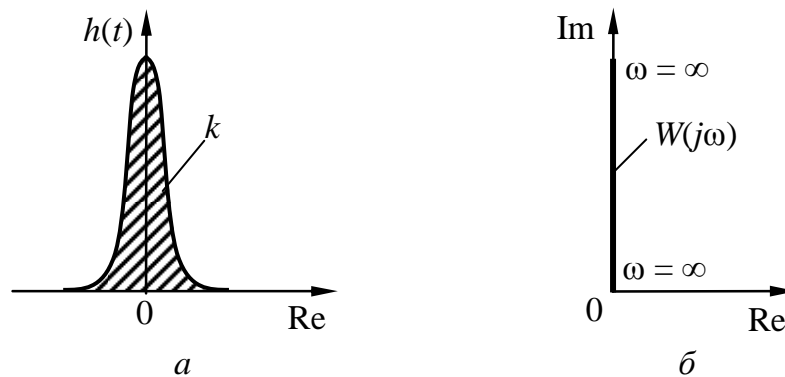


Рис. 1.7. Динамічні характеристики ідеальної диференціальної ланки:  
*a* – перехідна; *б* – амплітудно-фазова

Реальна диференціальна ланка (рис. 1.8):

$$W(p) = k \frac{Tp}{Tp+1}; \quad h(t) = ke^{-\frac{t}{T}} \cdot 1(t);$$

$$W(j\omega) = k \frac{jT\omega}{1+jT\omega}; \quad A(\omega) = k \frac{T\omega}{\sqrt{1+(T\omega)^2}};$$

$$\varphi(\omega) = \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg}(T\omega);$$

$$\operatorname{Re}(\omega) = k \frac{(T\omega)^2}{1+(T\omega)^2}; \quad \operatorname{Im}(\omega) = k \frac{T\omega}{1+(T\omega)^2}.$$

Стала часу  $T$  – це піддотична до графіка  $h(t)$  за будь-якого значення  $t$  (рис. 1.8, *a*) або  $T = 1/\omega_1$  (рис. 1.8, *б*).

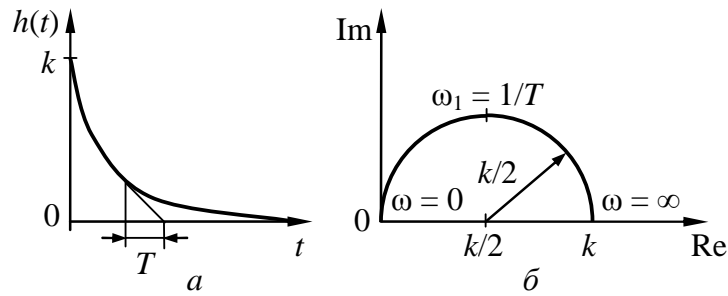


Рис. 1.8. Динамічні характеристики реальної диференціальної ланки:  
*a* – перехідна; *б* – амплітудно-фазова

Інтегро-диференціальна ланка (рис. 1.9):

$$W(p) = k \frac{\alpha T p + 1}{T p + 1}; \quad h(t) = k \left[ 1 - (1 - \alpha) e^{-\frac{t}{T}} \right];$$

$$W(j\omega) = k \frac{1 + j\alpha T \omega}{1 + jT \omega}; \quad A(\omega) = k \sqrt{\frac{1 + (\alpha T \omega)^2}{1 + (T \omega)^2}};$$

$$\varphi(\omega) = \arctg(\alpha T \omega) - \arctg(T \omega);$$

$$\operatorname{Re}(\omega) = k \frac{1 + \alpha(T \omega)^2}{1 + (T \omega)^2}; \quad \operatorname{Im}(\omega) = k(\alpha - 1) \frac{T \omega}{1 + (T \omega)^2}.$$

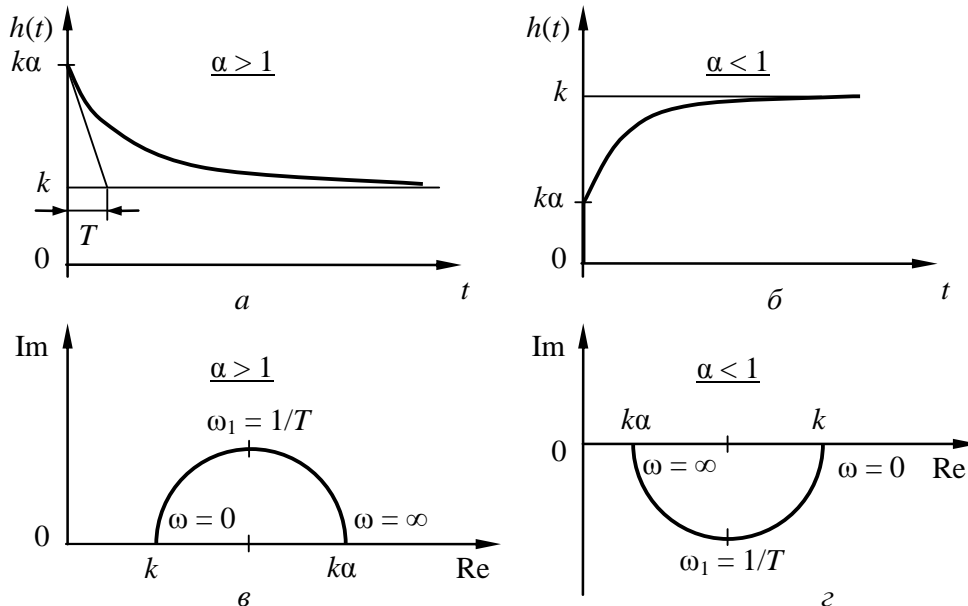


Рис. 1.9. Динамічні характеристики інтегро-диференціальної ланки:  
*a* – перехідна для  $\alpha > 1$ ; *б* – перехідна для  $\alpha < 1$ ; *в* – амплітудно-фазова для  $\alpha > 1$ ;  
*г* – амплітудно-фазова для  $\alpha < 1$



Аперіодична ланка першого порядку (деякі автори називають цю ланку інерційною) (рис. 1.10):

$$W(p) = \frac{k}{Tp+1}; \quad h(t) = k \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right);$$

$$W(j\omega) = \frac{k}{1+jT\omega}; \quad A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{1+(T\omega)^2}};$$

$$\varphi(\omega) = -\text{arctg}(T\omega);$$

$$\text{Re}(\omega) = \frac{k}{1+(T\omega)^2}; \quad \text{Im}(\omega) = -k \frac{T\omega}{1+(T\omega)^2}.$$

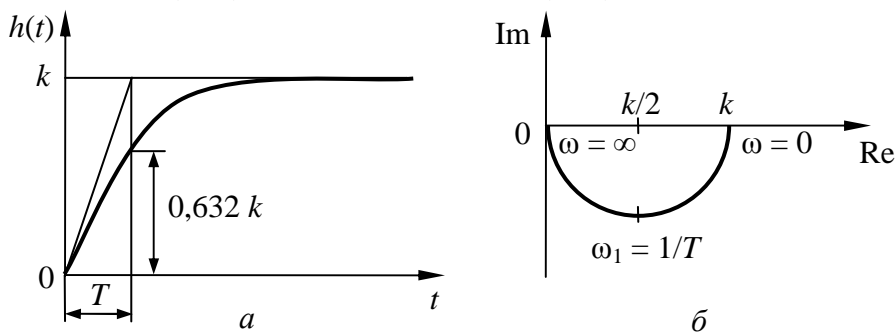


Рис. 1.10. Динамічні характеристики аперіодичної ланки першого порядку:  
а – перехідна; б – амплітудно-фазова

Аперіодична ланка другого порядку (рис. 1.11):

$$W(p) = \frac{k}{a_2 p^2 + a_1 p + 1}, \quad \text{де } a_1^2 - 4a_2 \geq 0;$$

$$h(t) = \begin{cases} k \left[ 1 + \frac{1}{a_2(p_1 - p_2)} \left( \frac{e^{p_1 t}}{p_1} - \frac{e^{p_2 t}}{p_2} \right) \right] & \text{для } a_1^2 - 4a_2 > 0; \\ k \left[ 1 - \frac{1}{a_2 p_1^2} (1 - p_1 t) e^{p_1 t} \right] & \text{для } a_1^2 - 4a_2 = 0, \end{cases}$$

де  $p_{1,2} = \frac{-a_1 \pm \sqrt{a_1^2 - 4a_2}}{2a_2}$  – корені характеристичного полінома  $a_2 p^2 + a_1 p + 1$ ;

$$W(j\omega) = \frac{k}{1 - a_2 \omega^2 + ja_1 \omega}; \quad A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{(1 - a_2 \omega^2)^2 + (a_1 \omega)^2}};$$

$$\varphi(\omega) = -\text{arctg} \frac{a_1 \omega}{1 - a_2 \omega^2};$$

$$\operatorname{Re}(\omega) = k \frac{1 - a_2 \omega^2}{(1 - a_2 \omega^2)^2 + (a_1 \omega)^2};$$

$$\operatorname{Im}(\omega) = -k \frac{a_1 \omega}{(1 - a_2 \omega^2)^2 + (a_1 \omega)^2}.$$

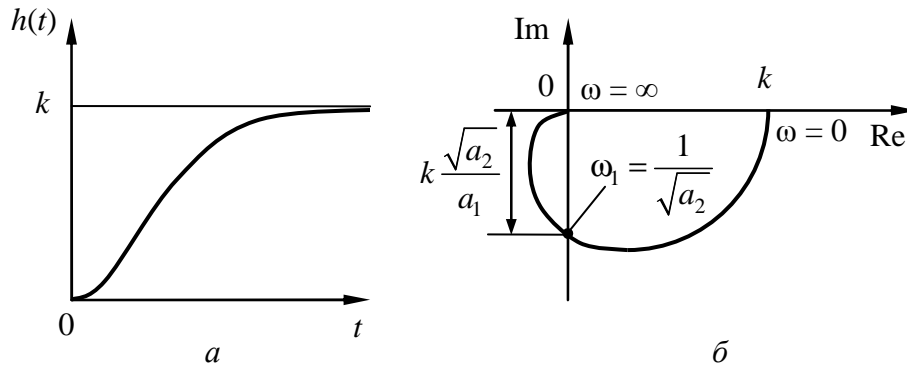


Рис. 1.11. Динамічні характеристики аперіодичної ланки другого порядку:  
*a* – перехідна; *б* – амплітудно-фазова

Коливальна ланка (рис. 1.12):

$$W(p) = \frac{k}{a_2 p^2 + a_1 p + 1},$$

де  $a_1^2 - 4a_2 < 0$ ;

$$h(t) = k \left\{ 1 - e^{\alpha t} \left[ \cos(\beta t) - \frac{\alpha}{\beta} \sin(\beta t) \right] \right\},$$

$$\text{де } \alpha = \frac{-a_1}{2a_2}, \quad \beta = \frac{\sqrt{4a_2 - a_1^2}}{2a_2};$$

$$W(j\omega) = \frac{k}{1 - a_2 \omega^2 + ja_1 \omega};$$

$$A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{(1 - a_2 \omega^2)^2 + (a_1 \omega)^2}};$$

$$\varphi(\omega) = -\operatorname{arctg} \frac{a_1 \omega}{1 - a_2 \omega^2};$$

$$\operatorname{Re}(\omega) = k \frac{1 - a_2 \omega^2}{(1 - a_2 \omega^2)^2 + (a_1 \omega)^2}; \quad \operatorname{Im}(\omega) = -k \frac{a_1 \omega}{(1 - a_2 \omega^2)^2 + (a_1 \omega)^2}.$$

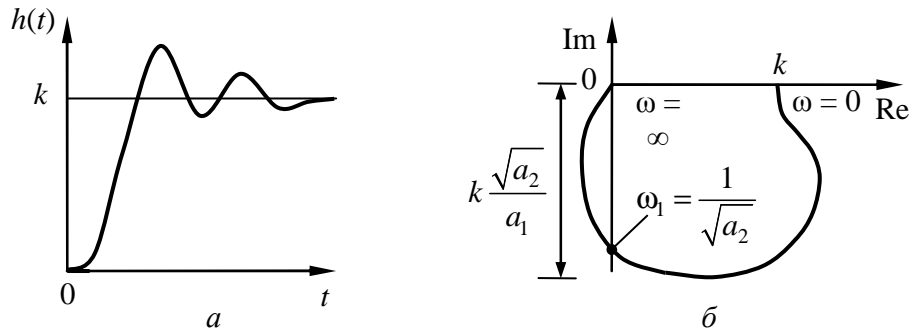


Рис. 1.12. Динамічні характеристики коливальної ланки:  
*a* – перехідна; *б* – амплітудно-фазова

Консервативна ланка (рис. 1.13):

$$W(p) = \frac{k}{a_2 p^2 + 1};$$

$$h(t) = k[1 - \cos(\beta t)], \text{ де } \beta = \frac{1}{\sqrt{a_2}};$$

$$W(j\omega) = \frac{k}{1 - a_2 \omega^2};$$

$$A(\omega) = \frac{k}{|1 - a_2 \omega^2|}; \quad \varphi(\omega) = \begin{cases} 0 & \text{для } \omega < \beta; \\ \pm\pi & \text{для } \omega > \beta; \end{cases}$$

$$\text{Re}(\omega) = \frac{k}{1 - a_2 \omega^2}; \quad \text{Im}(\omega) = 0.$$

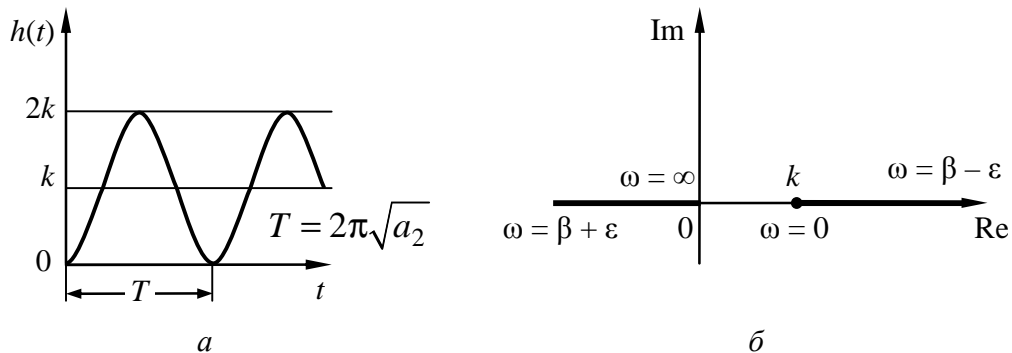


Рис. 1.13. Динамічні характеристики консервативної ланки:  
*a* – перехідна; *б* – амплітудно-фазова

Ланка транспортного запізнення (рис. 1.14):

$$W(p) = e^{-p\tau}; \quad h(t) = 1(t - \tau);$$

$$W(j\omega) = e^{-j\omega\tau}; \quad A(\omega) = 1; \quad \varphi(\omega) = -\omega\tau;$$

$$\text{Re}(\omega) = \cos(\omega\tau); \quad \text{Im}(\omega) = -\sin(\omega\tau),$$

де  $\tau$  – час транспортного запізнення.

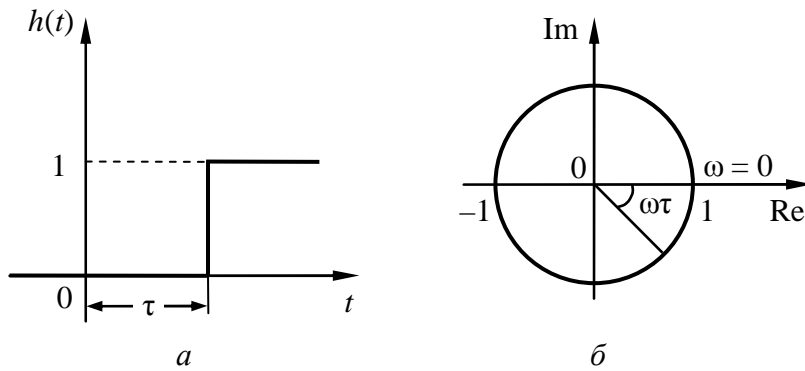


Рис. 1.14. Динамічні характеристики ланки транспортного запізнення:  
*a* – перехідна; *б* – амплітудно-фазова

Ланка транспортного запізнення має передавальну функцію, структура якої відрізняється від (1.1). Це найпростіший приклад об'єкта з розподіленими параметрами. Передавальна функція цієї ланки – трансцендентна, а приналежність її до елементарних динамічних ланок (до речі, цей набір не загальноприйнятний – він може бути як розширеним, так і звуженим) зумовлена тим, що в практиці аналізу систем керування дуже часто доводиться нею користуватись.

Динамічні моделі елементарних ланок часто використовують для отримання динамічних моделей складніших об'єктів моделювання, які для цього подають у вигляді різних поєднань тих чи тих елементарних динамічних ланок. Покажемо це на прикладі об'єкта другого порядку – аперіодичної ланки другого порядку, яку можна подати у вигляді послідовного з'єднання двох аперіодичних ланок першого порядку зі сталими часу  $T_1$  і  $T_2$ .

Передавальну функцію можна розглядати як оператор перетворення у динамічному режимі, оскільки за визначенням  $y(p) = W(p)x(p)$  (порівняйте у статиці:  $y = kx$ ). Тож для динамічних операторів перетворення, тобто  $W(p)$ , справедливі залежності (2.3) – (2.5) (Кн. 1), тому передавальну функцію аперіодичної ланки другого порядку  $W(p)$  записують як добуток передавальних функцій  $W_1(p) = k_1 / (T_1 p + 1)$  і  $W_2(p) = k_2 / (T_2 p + 1)$  цих аперіодичних ланок:  $W(p) = W_1(p)W_2(p)$ .

Тоді відповідно

$$\frac{k}{a_2 p^2 + a_1 p + 1} = \frac{k_1 k_2}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)},$$

звідки

$$k = k_1 k_2; a_2 = T_1 T_2; a_1 = T_1 + T_2.$$

Якщо диференціальне рівняння, що описує динаміку елементів системи керування, скажімо, ОК (чи систему в цілому), має порядок вищий, ніж другий, то такий елемент розглядають як сукупність кількох типових дина-

мічних ланок, з'єднаних послідовно. Наприклад, перехідний процес, зображений на рис. 1.15, відповідає об'єкту, який можна розглядати як з'єднання коливальної ланки та ланки чистого запізнення. Передавальна функція такого об'єкта матиме вигляд

$$W(p) = \frac{k}{a_2 p^2 + a_1 p + 1} e^{-p\tau}.$$

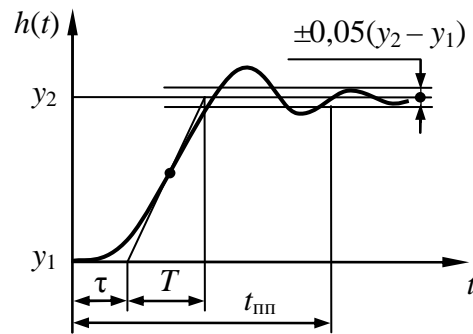


Рис. 1.15. Перехідна характеристика послідовного з'єднання коливальної ланки та ланки чистого запізнення

Окрім  $T$  і  $\tau$ , для об'єкта чи системи важливий час установлення вихідного сигналу (для засобів вимірювання – показань)  $t_{\text{пп}}$ , тобто час завершення перехідного процесу після стрибкоподібної зміни вхідного сигналу (цей час також називають часом реакції). Теоретично  $t_{\text{пп}}$  – нескінченно великий, але на практиці за час реакції зазвичай беруть той час, за який вихідний сигнал, наближаючись до нового сталого значення ( $y_2$ ), входить у зону, що відрізняється на  $\pm 5\%$  від повної зміни ( $y_2 - y_1$ ) вхідного сигналу, який відповідає цій стрибкоподібній зміні вхідного сигналу, і більше не виходить з неї (рис. 1.15).

Час реакції (швидкодію) можна приблизно визначити через його сталу часу з відношення  $t_{\text{пп}} \approx (3 \dots 5)T$ . За цей час значення вихідної величини досягає щонайменше 95% від приросту ( $y_2 - y_1$ ). Що вища швидкодія системи керування, то вищою вважають її якість, оскільки під час керування швидкоплинними процесами інерційність може призвести до виникнення значних динамічних похибок. Це особливо важливо враховувати в процесі створення систем керування.

Маючи графік  $h(t)$  чи годограф  $W(j\omega)$ , за їх формою можна спробувати віднести досліджуваний об'єкт до тієї чи тієї елементарної ланки, і навіть визначити параметри цієї ланки (коефіцієнти її передавальної функції). Це вже, власне, задача ідентифікації (розпізнавання). Більш детально з проблемами та алгоритмами ідентифікації динамічних характеристик можна ознайомитись зокрема в навчальному посібнику [17].

### 1.3. ДИФЕРЕНЦІАЛЬНІ РІВНЯННЯ ТА ПЕРЕДАВАЛЬНІ ФУНКЦІЇ ГРУП ДЕТЕКТУВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Досі мова йшла про динамічні властивості окремого елемента системи керування. Але, як зазначалось, нас в кінцевому підсумку цікавить поведінка системи (і в першу чергу – замкненої системи, адже саме у такому вигляді вона й застосовується). Отже, потрібно розглянути алгоритм визначення динамічних властивостей системи в цілому через динамічні властивості елементів, які входять до її складу.

Пояснимо спочатку термін «детектувальний елемент». Так називають елемент, який пропускає сигнал в одному напрямку (тому їх ще називають елементами спрямованої дії): від входу на вихід – це і є детектор. У чистому вигляді детектування в природі трапляється вкрай рідко (згадаймо третій закон Ньютона: дія дорівнює протидії, а отже, якщо вхід впливає на вихід, то й вихід має впливати на вхід). Вважатимемо, що детектування відбувається, коли вихід суттєво залежить від входу, тоді як вхід від виходу – набагато менше.

На рис. 1.16 показано схеми найпростіших з'єднань детектувальних елементів – послідовного та паралельного. Подібні схеми з'єднань ми вже розглядали (див. п. 2.2.2, Кн. 1), але тоді розглядалися статичні характеристики і було отримано вирази, якими визначалися коефіцієнти перетворення для різних з'єднань перетворювальних елементів у статичному режимі.

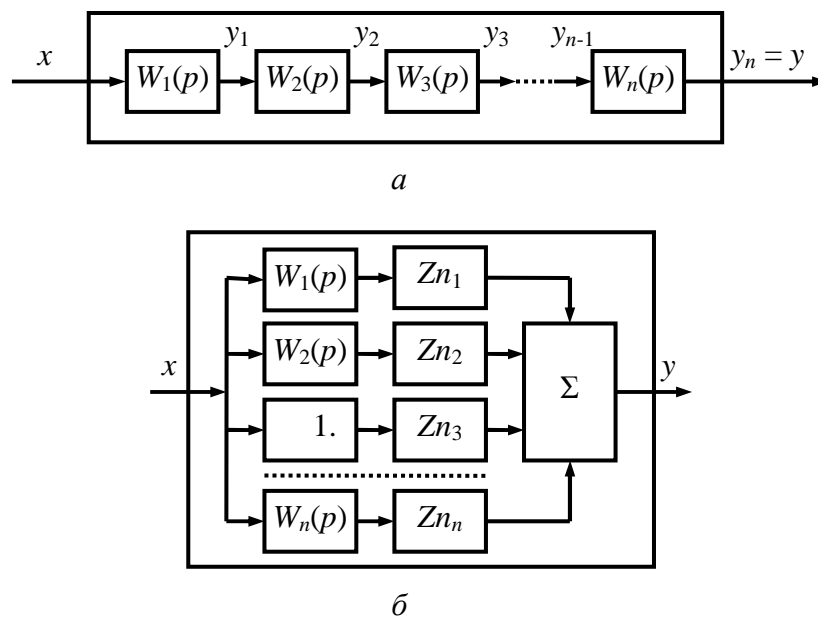


Рис. 1.16. Структурні схеми з'єднань детектувальних елементів:  
*a* – послідовного; *б* – паралельного

Як зазначалося, передавальну функцію можна розглядати як оператор перетворення у динамічному режимі, а отже, передавальні функції для наведених з'єднань елементів матимуть такий вигляд:

$$W(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p);$$

$$W(p) = \sum_{i=1}^n W_i(p) Z_{n_i},$$

тобто у разі послідовного з'єднання елементів їх передавальні функції перемножуються, а в разі паралельного – алгебрично додаються [тут  $Z_{n_i}$  – знак, з яким вихід відповідного  $i$ -го елемента бере участь у формуванні суми – це може бути (+1) або (-1)].

І, зрештою, розглянемо замкнений контур (рис. 1.17), який – для простоти – утворюють лише два елементи: об'єкт керування, що має передавальну функцію  $W_1(p)$ , та регулятор із передавальною функцією  $W_2(p)$  (порівняно зі схемою, наведеною на рис. 1.1, тут немає низки елементів – зазвичай вважають, що вони ввійшли до складу об'єкта керування – такий ОК називають *зведеним* – тож вихід регулятора на цій схемі безпосередньо став входом об'єкта і позначається як  $x$ ).

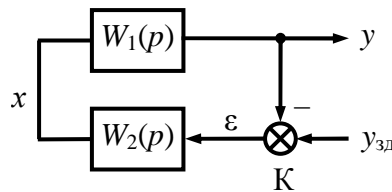


Рис. 1.17. Структурна схема найпростішої замкненої системи керування

Як зазначалося, для формування замкненої системи замикання контура може виконуватися за допомогою додатного чи від'ємного зворотного зв'язку. Розглянемо це питання детальніше. Припустимо, що кожен із елементів системи описують дробово-раціональною передавальною функцією. У такому разі вона може мати декілька коефіцієнтів, частина з яких може виявитись додатними (+), інші – від'ємними (-). Взагалі-то знак величини як і нуль відліку – це справа домовленості: якщо помножити дріб (передавальну функцію) на (-1), дріб не зміниться, але всі коефіцієнти змінять знаки на протилежні. Чи зміниться у цьому разі на протилежний і їх зміст? Звісно, ні. За домовленістю коефіцієнти у формулах передавальних функцій елементарних ланок формально мають знак плюс.

А от у разі замикання системи цієї знакової невизначеності, схоже, вдається позбутися, оскільки у цьому разі остаточно вирішено: або плюс (у разі додатного зворотного зв'язку), або мінус – у разі від'ємного. На рис. 1.17 замикання системи виконано за допомогою компаратора К, вихід

якого – відхилення  $\varepsilon$  поточного значення регульованого параметра  $y$  від його заданого значення  $y_{зд}$  – може бути як  $\varepsilon = y_{зд} - y$ , так і  $\varepsilon = y_{зд} + y$  (залежно від напрямку зміни виходу  $y$  відносно  $y_{зд}$ ).

Якщо  $y$  та  $y_{зд}$  подаються на компаратор (суматор) з однаковими знаками ( $\varepsilon = y_{зд} + y$ ), то зворотний зв'язок додатний, інакше – від'ємний. У теорії автоматичного керування знак зворотного зв'язку показують на компараторі (суматорі). На рис. 1.17 знак проставлено біля стрілки, яка відповідає сигналу  $y$ , що якраз і вказує на від'ємний зв'язок у схемі (коефіцієнти передачі решти елементів вважаємо додатними).

Передавальна функція, згідно з визначенням, – це відношення зображення виходу до зображення входу за нульових початкових умов. Для конкретності вважатимемо, що вхід замкненої системи, наведеної на рис. 1.17, наприклад  $y_{зд}$ , а вихід –  $x$  (як вихід також можна розглядати  $\varepsilon$ ,  $y$  чи будь-яку іншу проміжну величину, тобто величину сигналу в будь-якій точці контура чи навіть за його межами).

Отже, для обраного каналу

$$W_{y_{зд} \rightarrow x}(p) = \frac{x(p)}{y_{зд}(p)}, \quad (1.2)$$

де  $y_{зд}(p)$  та  $x(p)$  – зображення за Лапласом відповідних змінних.

Зворотний зв'язок – від'ємний:

$$\varepsilon = y_{зд} - y.$$

Виконаємо очевидне перетворення виразу (1.2):

$$W_{y_{зд} \rightarrow x}(p) = \frac{W_2(p)\varepsilon(p)}{\varepsilon(p) + y(p)} = \frac{W_2(p)}{1 + \frac{y(p)}{\varepsilon(p)}} = \frac{W_2(p)}{1 + W_1(p)W_2(p)}.$$

Якби зворотний зв'язок був додатним, то в знаменнику замість  $\varepsilon(p) + y(p)$  ми мали б  $\varepsilon(p) - y(p)$ , і в результаті останнього перетворення отримали б у знаменнику  $1 - W_1(p)W_2(p)$ .

А тепер розглянемо варіант, коли виходом вважається сигнал  $y$ :

$$W_{y_{зд} \rightarrow y}(p) = \frac{W_1(p)W_2(p)\varepsilon(p)}{\varepsilon(p) + y_{зд}(p)} = \frac{W_1(p)W_2(p)}{1 + W_1(p)W_2(p)}.$$

Ще один варіант – з виходом  $\varepsilon$ :

$$W_{y_{зд} \rightarrow \varepsilon}(p) = \frac{\varepsilon(p)}{y_{зд}(p)} = \frac{\varepsilon(p)}{\varepsilon(p) + y(p)} = \frac{1}{1 + W_1(p)W_2(p)}.$$

Узагальнимо отримані результати. Передавальна функція замкненої системи  $W_{з.с}(p)$  – це дріб, у чисельнику якого стоїть передавальна функція прямого каналу (від входу до виходу, без замикання системи, як, наприклад,



показано на рис. 1.16, а)  $W_{\text{пк}}(p)$ , а в знаменнику – одиниця плюс (якщо зворотний зв'язок від'ємний) або мінус (якщо додатний) передавальна функція розімкненої системи  $W_{\text{роз}}(p)$ :

$$W_{\text{з.с}}(p) = \frac{W_{\text{пк}}(p)}{1 + W_{\text{роз}}(p)}. \quad (1.3)$$

Сама передавальна функція розімкненої системи  $W_{\text{роз}}(p)$  записується без урахування знака замикання (його вже враховано знаком перед нею).

Передавальна функція та диференціальне рівняння відповідного каналу – це, як уже наголошувалось, різні форми подання (описування) динамічних властивостей цього каналу. Припустимо, що вхід – це  $x$ , вихід –  $y$ , тоді передавальна функція матиме такий вигляд:

$$W_{x \rightarrow y}(p) = \frac{y(p)}{x(p)}$$

або, що те саме,

$$y(p) = W(p)x(p). \quad (1.4)$$

Якщо

$$W(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0}, \quad (1.5)$$

то, підставляючи вираз (1.5) у (1.4), отримаємо:

$$\begin{aligned} (a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0) y(p) = \\ = (b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0) x(p). \end{aligned} \quad (1.6)$$

Рівняння (1.6) можна розглядати як операторну форму запису диференціального рівняння у загальному вигляді:

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = \\ = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t). \end{aligned} \quad (1.7)$$

Є просте правило: чисельник передавальної функції визначає праву частину диференціального рівняння, тоді як знаменник – ліву. У лівій частині збирають доданки з вихідним сигналом та його похідними, у правій – вхідний сигнал та його похідні. Множник  $p^i$  у доданку відповідає  $i$ -й похідній від вхідної чи вихідної величин.

Диференціальне рівняння (1.6) має характеристичне рівняння:

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0 = 0. \quad (1.8)$$

Для об'єктів із зосередженими параметрами (з дробово-раціональними передавальними функціями) характеристичне рівняння – це поліном від  $p$ , прирівняний до нуля. Сам же цей поліном (1.8) називають характеристичним:

$$A(p) = a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0. \quad (1.9)$$

Легко бачити, що поліном  $A(p)$  – це не що інше, як знаменник передавальної функції (1.5) – саме для того, щоб підкреслити цю обставину, на-вмисне для запису характеристичного рівняння (1.8) використано змінну  $p$  (параметр передавальної функції).

Отже, характеристичне рівняння замкненої системи з передавальною функцією (1.3) можна записати у такому вигляді:

$$1 + W_{\text{роз}}(p) = 0. \quad (1.10)$$

Із виразу (1.3) також видно, що характеристичне рівняння замкненої системи не залежить від каналу, оскільки передавальні функції різних каналів згідно з виразом (1.3) відрізняються тільки чисельниками (ними є передавальні функції відповідних прямих каналів  $W_{\text{п.к}_i}(p)$ ), а знаменники у них однакові:  $1 + W_{\text{роз}}(p)$ . Таким чином, характеристичне рівняння висвітлює деякі суттєві, спільні для всіх каналів об'єкта (в загальному випадку – системи) властивості об'єкта дослідження.

Буде цей об'єкт схильним до коливань чи аперіодичним, буде він стійким чи нестійким (детальніше – далі), будуть у ньому перехідні процеси згасати чи ні (це залежить від його стійкості), а якщо згасатимуть, то як швидко (за який час), та багато іншого про об'єкт дослідження можна дізнатись, аналізуючи характеристичне рівняння (1.8) чи – що майже те саме – характеристичний поліном (1.9).

## 1.4. ОБ'ЄКТИ КЕРУВАННЯ

Як зазначалося (див. п. 1.2.2 Кн. 1), об'єкт керування – це об'єкт, який піддається керувальним впливам для досягнення мети керування. У керуванні технологічними процесами під ОК розуміють технологічний процес (або його стадію) та устаткування, в якому він перебігає, тому часто його називають технологічним об'єктом керування (ТОК).

### 1.4.1. Класифікація об'єктів керування

За характером матеріальних та енергетичних зв'язків ОК поділяють на механічні, гідравлічні, теплові, хімічні, дифузійні тощо.

За динамічними властивостями розрізняють:

– об'єкти із зосередженими параметрами (це такі ОК, у яких в стані рівноваги регульовані параметри в кожній точці об'єкта в той самий час

мають майже однакові значення; наприклад, ресивер, у якому регульована величина – це тиск газу);

– об’єкти з розподіленими параметрами (такі, в яких значення параметрів у різних точках об’єкта не однакові; наприклад, тиск рідини в трубопроводі під час її транспортування, температура по довжині тунельної печі у виробництві цегли тощо).

Динамічні властивості ОК описують диференціальними рівняннями (ОК із зосередженими параметрами – звичайними, ОК із розподіленими параметрами – диференціальними рівняннями у частинних похідних), передавальними функціями  $W(p)$ , кривими розгону.

Поділ ОК за деякими іншими класифікаційними ознаками розглянемо далі.

#### 1.4.2. Канали впливу

Залежно від властивостей або призначення розрізняють технічні, технологічні, економічні, соціальні та інші ОК. Як зазначалося, під ОК ми розумітимемо технологічний процес (чи окрему його стадію) разом із устаткуванням, у якому він перебігає.

Об’єкт керування має один або декілька виходів (керованих параметрів), а також відповідні їм входи: керувальні впливи  $x_i$  та збурення  $\lambda_i$ . Наявність функціональної залежності між виходом і відповідним входом об’єкта розглядають як наявність в ОК *каналу впливу*. На структурній схемі у межах прямокутника, який позначає ОК, прямі лінії показують окремі канали (іноді зі стрілками). Кожен з каналів описують окремим диференціальним рівнянням.

Об’єкт, схему якого зображено на рис. 1.18, має два канали впливу:

- канал керувального впливу  $y = f_1(x)$ ;
- канал збурювального впливу  $y = f_2(\lambda)$ .

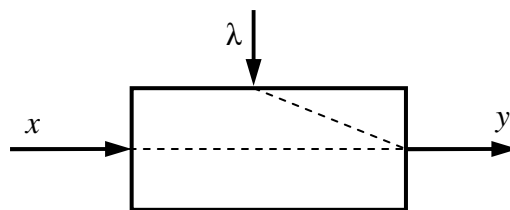


Рис. 1.18. Схема ОК з двома каналами впливу

За однакової кількості вихідних  $y_i$  та вхідних  $x_i$  параметрів у різних об’єктів кількість каналів впливу може бути різною – залежно від наявності внутрішніх взаємозв’язків між входами і виходами. За цією ознакою розрізняють об’єкти (рис. 1.19) з автономними (а), з частково зв’язаними (б) та взаємозв’язаними (в) каналами впливу.

Поняття про канали та їх динамічні властивості (незалежні від властивостей інших каналів об'єкта керування) орієнтовані переважно на стаціонарні (що не змінюють своїх властивостей у часі) та лінійні об'єкти<sup>1</sup>.

Важлива характеристика каналів впливу – їх *чутливість*, яку оцінюють відношенням зміни (приросту) вихідної величини  $\Delta y$  каналу впливу до зміни приросту вхідної величини  $\Delta x$ . Для об'єктів, які мають нелінійні статичні характеристики (такі об'єкти називають нелінійними), це відношення змінне, тому можна говорити про функцію чутливості. Для лінійних об'єктів відношення  $\Delta y/\Delta x$  стає і називається *коефіцієнтом передачі об'єкта*.

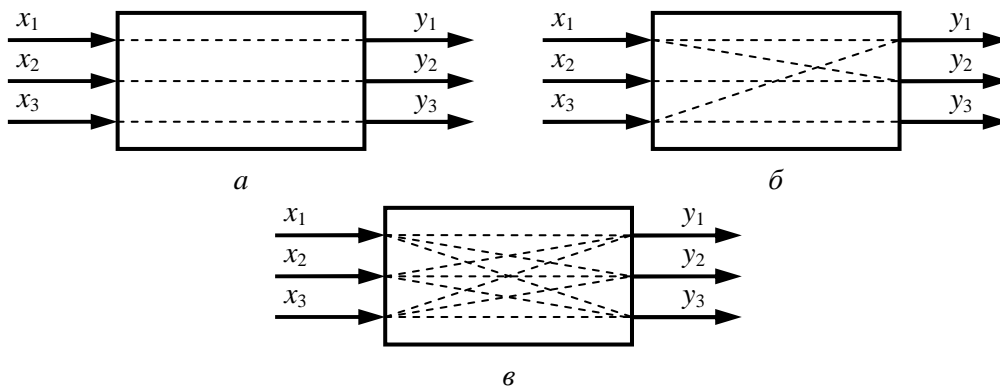


Рис. 1.19. Схеми ОК з різними взаємозв'язками каналів впливу:  
*а* – автономними; *б* – частково зв'язаними; *в* – взаємозв'язаними

Що більша чутливість каналу керування, то ефективнішим буде керування ОК за цим каналом. Чим більша чутливість каналу збурення, тим більше неприємностей можна очікувати від наявності відхилення у цьому каналі.

### 1.4.3. Статичне моделювання об'єктів керування

*Статичний режим* характеризується узгодженістю всіх матеріальних та енергетичних входів і виходів об'єкта й незмінністю в часі всіх його параметрів, які визначають цей режим роботи.

Статичний, сталий режим можна розглядати як окремий випадок більш поширеного динамічного (перехідного) режиму – адже ОК, як правило, перебуває в перехідних режимах і дуже рідко – у надійно сталому режимі. З другого боку, динамічний режим можна розглядати як перехідний між двома сталими статичними режимами, тож ці два режими перебувають у складному взаємозв'язку між собою.

Функціональну залежність виходів об'єкта  $y_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) від входів  $x_j$  ( $j = 1, \dots, m$ ) у статичних режимах роботи називають його *статичною моделлю*:

$$y_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_m), \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, m.$$

<sup>1</sup> *Лінійними* називають об'єкти, реакція яких на суму вхідних сигналів дорівнює сумі реакцій на кожен із вхідних сигналів окремо. Ця особливість лінійних об'єктів відповідає *принципу суперпозиції* (накладання).

Статичну модель, яка відображає всі взаємозв'язки об'єкта моделювання, називають *повною статичною моделлю*. Якщо модель відображає окремі зв'язки в об'єкті, таку модель називають *частинною*. Прикладом такої моделі може бути функціональний взаємозв'язок одного вихідного параметра об'єкта з усіма вхідними:

$$y_1 = f_1(x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_m).$$

У більшості випадків використовують саме такі статичні моделі.

Функціональну залежність вихідного параметра від вхідного в статичному режимі називають *статичною характеристикою* каналу впливу. Вона є математичною моделлю одного каналу впливу об'єкта моделювання для його функціонування в сталих режимах. Її можна подати у вигляді залежності

$$y_i = f_i(x_j).$$

Така характеристика показує, як змінюватиметься вихідна величина  $y_i$  відповідно до зміни вхідної величини  $x_j$  у статичних режимах, тобто в режимах, за яких перехідні процеси в об'єкті припиняються.

Найбільш проста аналітична залежність, яка відображає статичну характеристику, – це лінійне алгебричне рівняння

$$y_i = y_{i0} + kx_j,$$

де  $y_{i0} = y_i|_{x_j=0}$  – початкове значення вихідної величини.

Нелінійні статичні характеристики найчастіше подають у вигляді полінома

$$y = y_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n,$$

де  $a_1, a_2, \dots, a_n$  – коефіцієнти рівняння статички.

Якщо детермінованого (закономірного) зв'язку між вихідним та вхідними параметрами немає, тобто за наявності випадкових впливів та взаємозв'язків між параметрами об'єкта моделювання, його статичні характеристики подають як імовірні залежності – кореляційні та регресійні.

Статичні моделі можуть бути отримані аналітичним, експериментальним або експериментально-аналітичним методами.

**Аналітичний метод отримання статичних характеристик.** Аналітичний (розрахунковий) метод моделювання статички пов'язаний з отриманням рівнянь статички об'єкта моделювання для каналів впливу, що нас цікавлять. Кінцева мета моделювання статички такого об'єкта – розрахунок основного статичного режиму або отримання рівнянь статички чи статичних характеристик.

Під *основним статичним режимом* розумітимемо такий статичний режим, який характеризується значеннями технологічних параметрів, близькими до середини зони регламентних обмежень. Цей режим зазвичай початковий для динамічних перехідних процесів.

Для розрахунку основного статичного режиму потрібно мати рівняння або систему рівнянь у загальному вигляді. Для отримання рівнянь статички аналітичним методом потрібно скласти досить детальне уявлення про об'єкт моделювання, його межі, значення технологічних та конструктивних параметрів, а також зрозуміти, які функціональні залежності слід отримати, щоб можна було описати статистику досліджуваних каналів впливу.

Перед початком розробки рівнянь статички потрібно створити розрахункову схему об'єкта моделювання, що являє собою спрощене зображення об'єкта моделювання з нанесеними позначеннями технологічних та конструкційних параметрів об'єкта, які мають визначальний характер або входять у рівняння статички. Спрощення об'єкта моделювання ґрунтується на очевидних істинах або прийнятих припущеннях. На розрахунковій схемі зображається вже спрощений об'єкт з урахуванням прийнятих припущень.

Для створення рівнянь статички використовують найбільш загальні закономірності, а саме: закони збереження матерії та енергії, низку інших фундаментальних залежностей, виражених у вигляді рівнянь матеріального чи енергетичного балансів, – залежно від фізико-хімічного змісту вихідних параметрів (наприклад, якщо такий параметр – це рівень рідини, тиск газу чи концентрація компонента суміші, то складають рівняння матеріальних балансів, а якщо вихідний параметр – це температура, то складають рівняння теплового балансу). У певних випадках виникає потреба у складанні як матеріальних, так і теплових (енергетичних) балансів.

Ці рівняння можуть відображати як зв'язок об'єкта моделювання з іншими об'єктами, так і внутрішні залежності всередині об'єкта моделювання. У другому випадку для відтворення технологічних процесів, які проходять в об'єкті моделювання, використовують основні кінетичні, гідродинамічні, тепло- та масообмінні залежності цих процесів.

Рівняння сумарних балансів статички ґрунтуються на передумові, що загальна кількість речовини або енергії, які входять в об'єкт, дорівнює загальній кількості речовини чи енергії, що виходять з нього, а кількість речовини чи енергії, що перебуває в об'єкті, залишається незмінною, як і значення технологічного параметра, що її відображає.

Рівняння сумарного балансу – як матеріального, так і енергетичного – можна записати у вигляді

$$Q_{\text{вх}} = Q_{\text{вих}},$$

де  $Q_{\text{вх}} = \sum_{j=1}^m Q_{\text{вх}j}$  – сумарний вхід речовини або енергії;  $m$  – кількість вхідних потоків речовини або енергії;  $Q_{\text{вх}j}$  – кількісне значення  $j$ -го масового потоку речовини або енергії;  $Q_{\text{вих}} = \sum_{i=1}^n Q_{\text{вих}i}$  – сумарний вихід речовини або енергії з об'єкта;  $n$  – кількість вихідних потоків речовини або енергії;  $Q_{\text{вих}i}$  – кількісне значення  $i$ -го масового потоку речовини або енергії.

Отже, рівняння сумарного матеріального чи теплового балансу матиме такий вигляд:

$$\sum_{j=1}^m Q_{\text{вх}j} = \sum_{i=1}^n Q_{\text{вих}i}. \quad (1.11)$$

Розв'язавши отримане сумарне рівняння (1.11) (чи систему рівнянь) відносно входу та виходу, отримують рівняння статичної характеристики. Для більшої наочності вона може бути подана у графічній формі.

**Припущення аналітичного моделювання.** Відображення в моделях усіх чинників та каналів впливу (серед яких є несуттєві) спричинює значне ускладнення моделі, не забезпечуючи цим істотного підвищення точності моделей. З огляду на це під час моделювання приймають певні припущення, які дають змогу дещо спростити об'єкт за рахунок відкидання (обґрунтованого) малозначущих чинників, істотно не знижуючи точності чи адекватності моделі.

Так, скажімо, незважаючи на те, що в об'єктах моделювання зазвичай всі входи зв'язані з усіма виходами, після аналізу глибини цього взаємозв'язку декотрими з цих зв'язків можна знехтувати. Здійснивши аналіз чутливості різних каналів впливу, можна відкинути ті з них, в яких поряд із малою чутливістю ще й зміни вхідної величини порівняно малі. Нехтують також каналами впливу, в яких імовірність суттєвої зміни вхідної величини близька до нуля.

Досить часто припускають, що залежність між входом і виходом лінійна. Такий підхід значно спрощує математичну модель, але це не завжди правомірно. Для прикладу розглянемо проточну місткість (рис. 1.20, а), через яку протікає теплоносій у рідкому стані (рідина майже не змінює свого об'єму зі зміною тиску).

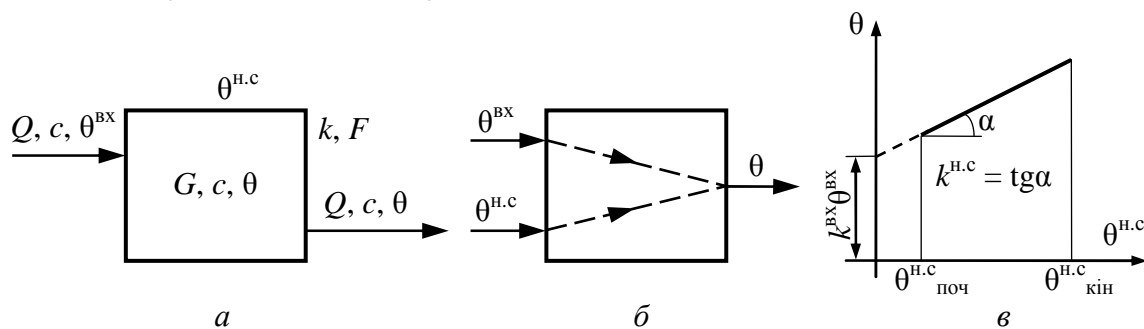


Рис. 1.20. Схеми проточної теплової місткості: а – розрахункова; б – структурна; в – вигляд статичної характеристики

Рівняння теплового балансу цієї місткості в першому наближенні можна записати у такому вигляді:

$$Qc\theta^{\text{вх}} - Qc\theta - kF(\theta - \theta^{\text{н.с}}) = 0, \quad (1.12)$$

де  $Q$  – витрата теплоносія через місткість;  $c$  – коефіцієнт теплоємності теплоносія;  $\theta^{\text{вх}}$  – температура на вході в місткість;  $\theta$  – температура в місткості;

$\theta^{h.c}$  – температура навколишнього середовища;  $k$  – коефіцієнт теплопередачі між теплоносієм у місткості та навколишнім середовищем;  $F$  – поверхня теплообміну між теплоносієм і середовищем;  $G$  – кількість теплоносія.

Рівняння (1.12) відображає баланс приходу та витрати тепла в проточній місткості за одиницю часу:  $Qc\theta^{bx}$  – тепло, що потрапляє в місткість із потоком теплоносія;  $Qc\theta$  – тепло, що виноситься з місткості з потоком теплоносія;  $kF(\theta - \theta^{h.c})$  – тепло, яке втрачає місткість через теплообмін із навколишнім середовищем.

Зрозуміло, що обрання напрямку руху тепла за рахунок теплообміну з навколишнім середовищем досить умовне. Припускаючи, що тепло «залишає» місткість, ми у виразі  $kF(\theta - \theta^{h.c})$  від температури  $\theta$  віднімаємо  $\theta^{h.c}$ , якщо ж припустити протилежний напрямок теплового потоку, то знаки у дужках слід буде змінити на протилежні. В результаті складова теплового балансу з  $-kF(\theta - \theta^{h.c})$  змінилася б на  $+kF(\theta^{h.c} - \theta)$ , тобто фактично залишилася незмінною. Насправді можна й не знати напрямку руху тепла, адже у процесі зміни стану об'єкта можуть змінюватись як  $\theta$  та  $\theta^{h.c}$ , так і знак їх різниці. Однак рівняння (1.12) за таких змін залишається справедливим.

Під час запису рівняння (1.12), окрім зазначених, зроблено низку додаткових припущень. А для самої місткості прийнято модель так званого ідеального перемішування, вважаючи, що теплоносії миттєво й ідеально перемішується (типовий об'єкт із зосередженими параметрами), через що його температура усереднюється по всій масі. Це температура  $\theta$  (саме з такою температурою теплоносії залишає місткість). Нею ж визначається тепловий потік через стінки місткості. Очевидно, що для перемішування потрібно витратити енергію, і що інтенсивнішим буде перемішування, то більше енергії буде витрачено. Але цієї складової енергії (в процесі перемішування вона перетворюється на теплову енергію – тепло) в рівнянні (1.12) не відображено. Це буде справедливо, якщо ця складова виявиться малою порівняно з врахованими у рівнянні (1.12) тепловими потоками.

Не враховують також кінетичних енергій потоків, які входять і виходять з місткості, та залежності коефіцієнта теплоємності  $c$  від температури. Виправданням може бути порівняно слабка залежність теплоємності рідини від її температури в достатньо вузькому діапазоні її змін. Остання обставина (малий діапазон очікуваних змін) мотивується призначенням математичної моделі об'єкта для дослідження його поведінки у складі системи автоматичного керування. У ній регулятор має сам слідкувати за тим, щоб температура  $\theta$  мала мінімальне відхилення від її заданого значення, в околі якого модель об'єкта буде адекватною.

Як уже зазначалося, в автоматичі прийнято називати вхідними сигналами (входами) можливі причини зміни стану (це зазвичай зовнішні чинники), тоді як виходами вважають параметри стану самого об'єкта.



Отже, структурно цей об'єкт можна подати так, як показано на рис. 1.20, б. За допомогою очевидних перетворень приведемо рівняння статичної (1.12) у відповідність до цієї структури:

$$\theta = k_{\text{вх}}\theta^{\text{вх}} + k_{\text{н.с}}\theta^{\text{н.с}}, \quad (1.13)$$

де 
$$k_{\text{вх}} = \frac{Qc}{Qc + kF}; \quad k_{\text{н.с}} = \frac{kF}{Qc + kF} = 1 - k_{\text{вх}}.$$

На рис. 1.20, в показано можливий вигляд статичної характеристики модельованого об'єкта.

**Експериментальні методи отримання статичних характеристик.** Для експериментального отримання статичних моделей та характеристик застосовують такі основні методи:

- експериментальний детермінований метод;
- експериментально-статистичний метод;
- експериментально-аналітичний метод.

*Експериментальний детермінований метод* отримання статичних характеристик передбачає наявність детермінованого (визначеного, закономірного) зв'язку між вхідною та вихідною величинами і спрямований на визначення такого зв'язку. Позаяк на корисний сигнал можуть діяти сигнали завад, то перед використанням чи апроксимацією отриманих статичних характеристик виникає потреба у фільтруванні з експериментальних даних сигналів завад, тобто отримання чистого корисного сигналу. Таке оброблення називається згладжуванням експериментальних даних. У подальшому обробленні таким способом дані детермінованого експерименту апроксимують математичними виразами, які й будуть шуканими функціональними залежностями.

*Експериментально-статистичний метод* отримання статичних характеристик ґрунтується на інших засадах: не відкидаючи можливості існування детермінованих зв'язків між параметрами об'єкта моделювання, він, однак, не націлений на виявлення цих функціональних зв'язків – цей метод тільки виявляє імовірний зв'язок між двома чи більшою кількістю параметрів об'єкта моделювання. Метод ґрунтується на тому, що в разі зміни вхідного параметра змінюватиметься вихідний параметр на відповідну величину з певним ступенем ймовірності, який залежатиме від різних чинників: кількості отриманих експериментальних даних, методики планування та оброблення експерименту тощо. Експериментально-статистичний метод ґрунтується на випадкових величинах, функціях та процесах. Його можна розділити на метод активного та пасивного експерименту. *Метод активного експерименту* полягає у формуванні та подачі на вхід досліджуваного об'єкта спеціальних збурень – білих шумів, псевдовипадкових послідовностей тощо. *Метод пасивного експерименту* не передбачає подачі спеціальних збурень. У цьому разі проводять збір даних про значення вхідних та вихідних величин у певні моменти часу під час нормальної експлуатації об'єкта моделювання. Метод пасивного експерименту також застосовують в алгоритмах поточної

ідентифікації, тобто для визначення параметрів моделей (параметрична ідентифікація) або їх структури та параметрів (структурна ідентифікація) під час функціонування комп'ютерних систем керування, які використовують розроблені моделі.

Статичні характеристики, отримані статистичними методами, мають вигляд рівнянь регресії чи кореляційних функцій.

*Експериментально-аналітичний метод* отримання статичних характеристик поєднує кращі якості аналітичного та експериментального методів. Аналітичний метод дає змогу отримати статичні характеристики зі структурою досить близькою до структури об'єкта моделювання. Це підвищує їх надійність та дає змогу використовувати їх у широкому діапазоні зміни параметрів.

Однак отримані аналітично статичні характеристики зазвичай мають невисоку точність. Це зумовлено можливою неточністю задавання деяких параметрів об'єкта та прийняттям певних припущень, через що розраховані коефіцієнти статичної моделі неточні. З другого боку, експериментальні моделі досить точні, але вони не відображають структури об'єкта, тому їх можна використовувати тільки у вузькому діапазоні зміни параметрів в інтервалі їх значень, які використовувалися під час експерименту.

В експериментально-аналітичних моделях використовують структуру аналітично отриманих моделей, а коефіцієнти для них розраховуються за експериментальними даними. Це дає змогу використовувати переваги як аналітичного, так і експериментального методів.

**Апроксимація статичних характеристик.** *Апроксимація* – це наближений опис графічно або аналітично поданих залежностей математичними функціями. Залежність, яка апроксимується, називається апроксимованою, отриманий же математичний вираз називають апроксимувальною функцією. Найчастіше піддають апроксимації експериментально отримані графічні залежності, задані графіками або таблицями відповідностей. А сама залежність, що апроксимується, може бути лінійною, близькою до лінійної або істотно нелінійною.

Близькі до лінійних залежності можна наближено, якщо точність задовольняє, апроксимувати лінійними функціями. Операцію наближеної апроксимації нелінійних виразів лінійними залежностями називають *лінеаризацією*. Якщо ж точність апроксимації не задовольняє, то апроксимацію виконують нелінійними виразами. Так само нелінійними виразами виконується апроксимація істотно нелінійних залежностей.

Лінеаризувати у широкому діапазоні змінюваності входу можна лише такі статичні характеристики, які мають несуттєву нелінійність (наприклад, градувальні характеристики термопар), інакше отримана лінійна характеристика може виявитися неадекватною.

Досить поширена лінеаризація у вузькому діапазоні, її ще називають лінеаризацією в околі певної точки. Таку лінеаризацію найчастіше виконують розкладанням нелінійної залежності в ряд Тейлора із подальшим

відкиданням малих доданків другого, третього та наступних ступенів малізми, тобто нелінійні складові розкладу.

Припустимо, що є нелінійна функція  $y = f(x)$ , і її потрібно розкласти в ряд Тейлора в околі точки  $x = x_0$ . Таке розкладання матиме вигляд:

$$y = f(x) = f(x_0) + \sum_{i=0}^n \frac{d^i f(x)}{dx^i} \Big|_{x=x_0} \cdot \frac{\Delta x^i}{i!} =$$

$$= f(x_0) + \frac{df(x)}{dx} \Big|_{x=x_0} \cdot \frac{\Delta x}{1!} + \frac{d^2 f(x)}{dx^2} \Big|_{x=x_0} \cdot \frac{\Delta x^2}{2!} + \dots + \frac{d^n f(x)}{dx^n} \Big|_{x=x_0} \cdot \frac{\Delta x^n}{n!}, \quad (1.14)$$

де  $\Delta x = x - x_0$  – малий приріст аргумента  $x$ .

Якщо прийняти, що  $y_0 = f(x_0)$ , то вираз (1.14) можна звести до вигляду

$$y = f(x) = f(x_0 + \Delta x) = y_0 + \frac{df(x)}{dx} \Big|_{x=x_0} \cdot \Delta x + \frac{1}{2} \frac{d^2 f(x)}{dx^2} \Big|_{x=x_0} \cdot \frac{\Delta x^2}{2!}.$$

Якщо  $\Delta x$  – мала величина, то  $\Delta x_2, \Delta x_3, \dots, \Delta x_n$  – малі відповідно другого, третього, ...,  $n$ -го ступенів малізми, відкинувши які отримаємо вираз для лінійного наближення (лінеаризації) нелінійної функції  $y = f(x)$ :

$$y \approx y_0 + \frac{df(x)}{dx} \Big|_{x=x_0} \cdot \Delta x.$$

Для побудови статичної характеристики використовують також вираз у приростах:

$$\Delta y = y - y_0 = \frac{df(x)}{dx} \Big|_{x=x_0} \cdot \Delta x.$$

У разі отримання статичних характеристик експериментально результати експерименту спочатку фільтрують (згладжують), а вже потім апроксимують відповідними методами.

#### 1.4.4. Математичне моделювання динаміки об'єктів керування

**Динамічний режим та динамічні характеристики об'єктів керування.** *Динамічним режимом* називають перехідний режим між певними сталими (статичними) режимами. На відміну від статичного режиму, в динамічному режимі значення визначальних параметрів залежать від часу. Під час нормальної експлуатації об'єкти керування зазвичай перебувають у несталих, перехідних, динамічних режимах, а сталі (статичні) – лише окремі випадки цих динамічних режимів.

Математичним описом ОК в динамічному режимі є *динамічна модель*, яка визначає взаємозв'язки параметрів такого об'єкта в динамічному режимі.

Зазвичай для задач керування користуються певною частинною моделлю, що визначає вплив вхідних параметрів  $x_j$  об'єкта на його вихідну величину  $y(t)$ :

$$y(t) = f[x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)], \quad (1.15)$$

де  $x_1(t), \dots, x_m(t)$  – вхідні величини, що можуть змінюватись у часі.

Вираз (1.15) називають рівнянням динаміки об'єкта моделювання. Крім рівняння динаміки, для опису динамічного режиму ОК використовують динамічні характеристики окремих каналів впливу:

$$y_i(t) = f_i[x_j(t)], \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, m.$$

Динамічні характеристики фактично відображають реакцію вихідної величини об'єкта керування на певну зміну вхідного параметра (збурення). Для порівняння динамічних властивостей об'єктів моделювання використовуються певні стандартні види динамічних характеристик, для отримання яких використовують збурення стандартної форми.

Залежно від виду збурювального впливу динамічні характеристики поділяються на часові (з використанням одноразових збурень) та частотні (з використанням періодичних збурень синусоїдальної форми). До часових належать імпульсні, перехідні, рампові характеристики та криві розгону, подані в аналітичному або графічному виглядах, до частотних – АФХ, ФЧХ, логарифмічні частотні характеристики (ЛЧХ).

**Основні динамічні властивості об'єктів керування.** Вся різноманітність об'єктів керування характеризується такими загальними для всіх ОК властивостями: акумулювальна здатність, самовирівнювання, швидкодія.

**Акумулювальна здатність об'єктів керування.** Здатність ОК акумулювати робоче середовище або енергію, накопичувати їх усередині об'єкта називається *акумулювальною здатністю* або *ємністю об'єкта*. Накопичення речовини або енергії можливе завдяки тому, що в кожному об'єкті є опір виходу речовини або енергії з об'єкта. Наприклад, наявність гідравлічного опору труб і місцевих опорів (зокрема регульованих) дає змогу регулювати рівень в апараті (акумулювати кількість рідини в ньому). В тепловому об'єкті, наприклад, у печі, акумулювання підведеної енергії можливе завдяки опору об'єкта її розсіюванню (тобто виходу із печі) за рахунок теплоізоляції. Об'єкт керування, що складається із однієї ємності й одного опору, називається одноємнісним (рис. 1.21, а).

Об'єкт керування, що містить дві або декілька ємностей, які беруть участь у процесі керування (наприклад, у випарнику, що використовується в процесі підготовки сировини для отримання технічного вуглецю – див. рис. 1.21, б, окрім самого випарника є ще одна ємність – піновідділювач, але вона не бере участі в регулюванні рівня, тому об'єкт цей – одноємнісний), називається дво- або багатоємнісним. Наприклад, дві послідовно з'єднані гідравлічні ємності утворюють двоємнісний ОК (рис. 1.21, в), а ректифікаційна колона – це багатоємнісний об'єкт, кількість ємностей якого дорівнює кількості тарілок колони.

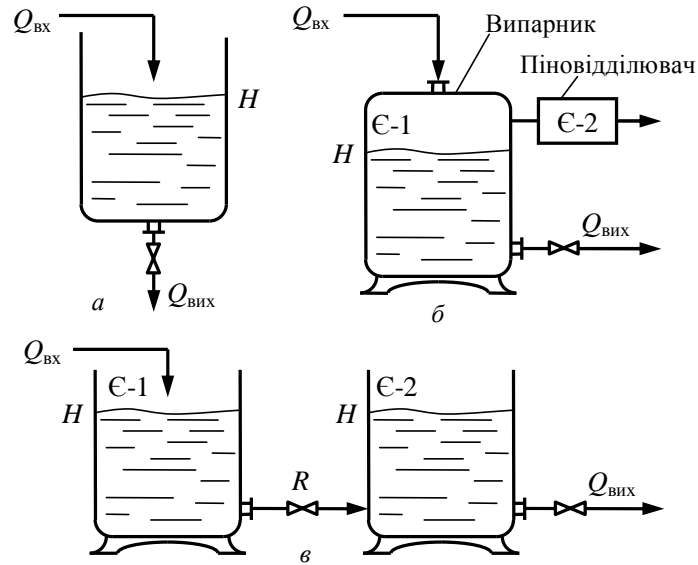


Рис. 1.21. Гідравлічні об'єкти керування: *a*, *б* – одноємнісні; *в* – двоємнісний

**Самовирівнювання об'єктів керування.** Самовирівнюванням називається здатність об'єкта після нанесення збурення приходити до нового сталого стану без втручання регулятора (її ще називають *саморегулюванням*). Самовирівнювання – наслідок дії внутрішнього зворотного зв'язку в стійкому об'єкті. Що більша ця здатність, то менше під дією збурення відхилятиметься керований параметр від стану рівноваги, що існував до збурення. Самовирівнювання сприяє стабілізації керованої величини в об'єкті і, таким чином, полегшує роботу системи керування. За цією ознакою ОК поділяють на об'єкти з позитивним, негативним самовирівнюванням і нейтральним (без самовирівнювання).

Керована величина  $H$  об'єкта без самовирівнювання (рис. 1.22) після завдання збурення  $\Delta Q$  на вході вільно змінюється, збільшується чи зменшується, тобто керований параметр ніякого зворотного впливу на надходження  $Q_{\text{вх}}$  або витрату  $Q_{\text{вих}}$  не чинить.

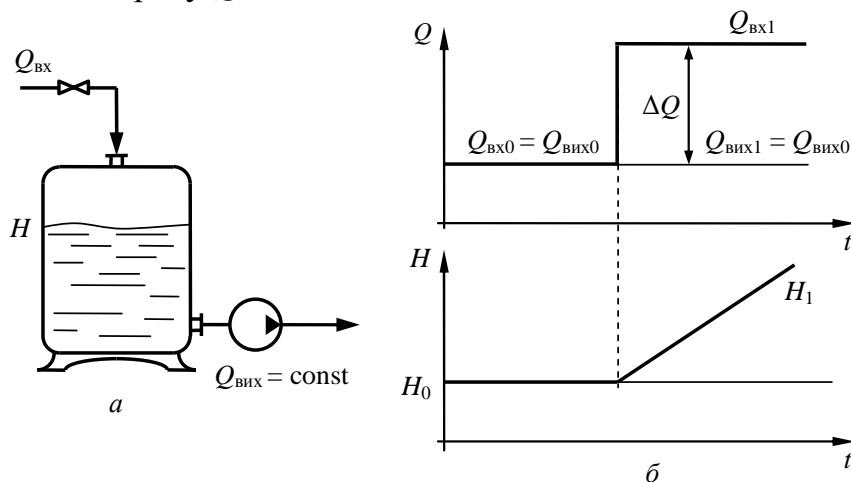


Рис. 1.22. Об'єкт без самовирівнювання: *a* – схема; *б* – динамічна характеристика

У статичних режимах проводять розрахунки фізико-хімічних процесів, обчислюють рівняння матеріальних та енергетичних балансів тощо. В системах керування статичні моделі застосовують в алгоритмах обчислення розрахункових параметрів, в алгоритмах статичної оптимізації та для задавання початкового статичного режиму в динамічних процесах.

Інакше проходять перехідні процеси в об'єкті з позитивним самовирівнюванням (рис. 1.23). Зі зміною витрати на вході  $Q_{\text{вх}} > Q_{\text{вих}}$  рівень у ємності збільшуватиметься (спричиняючи зростання  $Q_{\text{вих}}^2$ ) доти, доки  $Q_{\text{вих}}$  не стане рівним новому значенню  $Q_{\text{вх}}$ . У цьому разі рівень  $H$  досягне нового сталого значення  $H_1$ , і система прийде до рівноваги.

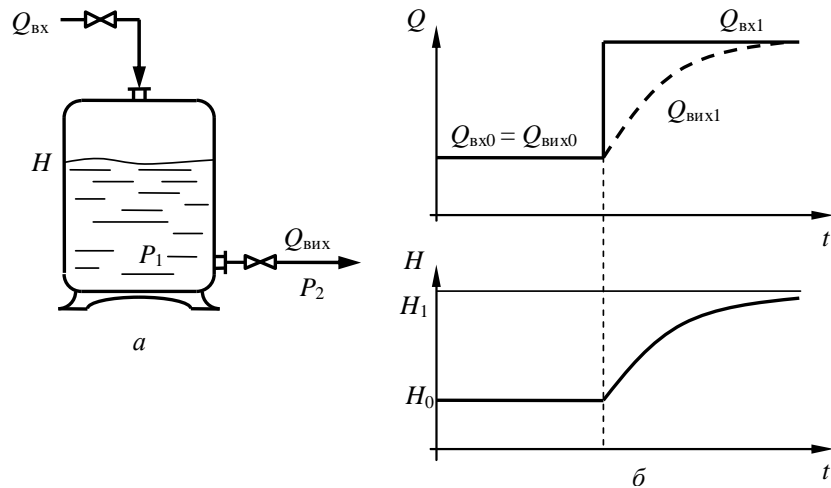


Рис. 1.23. Об'єкт з позитивним самовирівнюванням на виході:  
а – схема; б – динамічна характеристика

Приклад об'єкта з позитивним самовирівнюванням на вході показано на рис. 1.24. Він має на виході насос зі змінною продуктивністю, а трубу вхідного потоку опущено до дна резервуара.

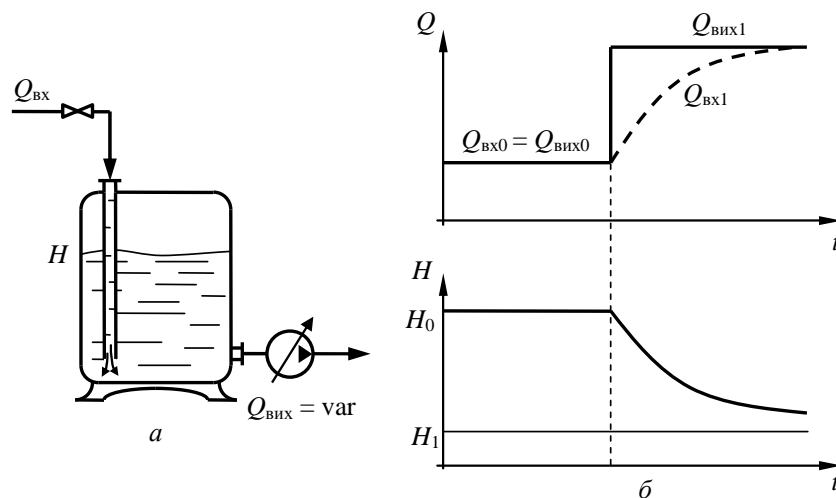


Рис. 1.24. Об'єкт з позитивним самовирівнюванням на вході:  
а – схема; б – динамічна характеристика

<sup>2</sup>  $Q_{\text{вих}} = \alpha \varepsilon F \sqrt{2 / \rho (P_1 - P_2)}$ . Якщо  $P_2 = 0$ , а  $P_1 = \rho g H$ , то  $Q_{\text{вих}} = \alpha \varepsilon F \sqrt{2 g H} = k \sqrt{H}$ .

Зі зміною витрати на виході  $Q_{\text{вих}}$  відповідно змінюватиметься й рівень  $H$  у ємності. Так, у разі збільшення  $Q_{\text{вих}}$  він знижуватиметься, зменшуючи опір витіканню води з труби в резервуар, що спричинить зростання витрати рідини на вході, аж поки вона не зрівняється з новим значенням витрати на виході:  $Q_{\text{вх1}} = Q_{\text{вих1}}$ . У цьому разі рівень  $H$  зменшиться до нового сталого значення  $H_1$ , і система набуде нового зрівноваженого стану.

Об'єкти з від'ємним самовирівнюванням – нестійкі: в них нерівність притоку і витoku речовини чи енергії через об'єкт, що виникає після збурення, призводить до того, що швидкість зміни визначального технологічного параметра прогресивно зростає. Приклад такого об'єкта – реактор ідеального перемішування, в якому відбувається екзотермічна реакція. Якщо тепло реакції буде більшим за тепло, яке відводиться системою охолодження, температура в реакторі почне підвищуватися, при цьому збільшиться ступінь перетворення реагентів, що в свою чергу призведе до подальшого підвищення температури в реакторі, швидкість зміни якої зростатиме. Ще одним прикладом об'єкта з від'ємним самовирівнюванням можуть служити апарати, в яких відбуваються автокаталітичні реакції. Якщо таким процесом не керувати, то в разі позитивного автокаталізу реакція самоприскорюється, а в разі негативного – уповільнюється аж до припинення. Така поведінка реакторів у перехідному режимі пояснюється наявністю в них внутрішніх додатних зворотних зв'язків.

Є також об'єкти, які в різних режимах роботи можуть мати різні види самовирівнювання. Приклад такого об'єкта – кульовий барабанний млин (КБМ) як об'єкт регулювання завантаження барабана млина вихідним продуктом (сировиною) [19]. Перехідну (розгінну) характеристику КБМ після ступінчастої зміни положення  $m$  регулювального органу подавання сировини зображено на рис. 1.25.

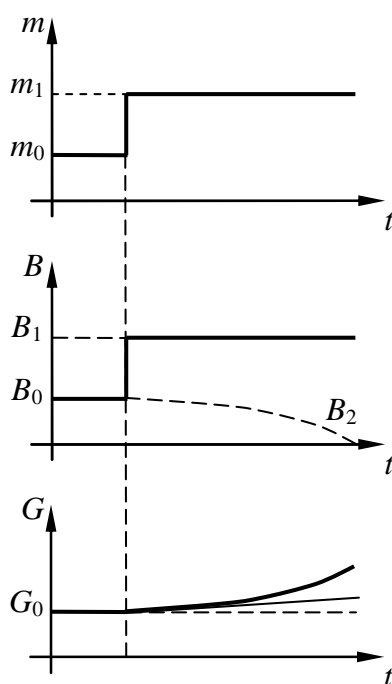


Рис. 1.25. Розгінна характеристика КБМ

У разі завантажень нижче від нормальних млин має позитивне самовирівнювання, тобто він стійкий об'єкт. За номінального навантаження самовирівнювання млина дорівнює нулю, тобто в цьому режимі він астатичний об'єкт. Нарешті, переобтяжений млин стає нестійким об'єктом, оскільки продуктивність млина (видача подрібненого матеріалу, наприклад, вугільного пилу  $B_2$ ) зменшується зі збільшенням завантаження  $G$  його сировиною. Якщо в режимі, за якого КБМ перебуває на межі стійкості, порушити рівноважний стан млина за рахунок збільшення подачі сировини  $B_1$ , то збільшення завантаження, що відбуватиметься у цьому разі, зумовить у свою чергу зменшення видачі пилу  $B_2$ . Розбаланс між подаванням сировини  $B_1$  і видаванням пилу  $B_2$  безперервно зростатиме, зумовлюючи подальше збільшення завантаження  $G$  з дедалі більшою швидкістю. Якщо вчасно не зменшити подачу, то млин швидко виявиться заваленим сировиною.

Щоб з'ясувати, стійкий об'єкт чи нестійкий, достатньо знати, як впливає в АСР відхилення регульованого параметра на прихід і витрату речовини або енергії в об'єкті. Якщо збільшення параметра викликає зменшення розбалансу, то об'єкт має позитивне самовирівнювання. Для астатичного (нейтрального) об'єкта зміна регульованого параметра не впливає на надходження речовини чи енергії. Якщо ж зі зростанням регульованого параметра розбаланс збільшується, то об'єкт нестійкий, тобто має негативне самовирівнювання.

Математично самовирівнювання ОК визначають за виглядом його рівняння динаміки:

$$1) T_{об} \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = k_1 x(t) \text{ – з позитивним самовирівнюванням;}$$

$$2) \frac{dy(t)}{dt} = k_2 x(t) \text{ – без самовирівнювання;}$$

$$3) -T_{об} \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = k_3 x(t) \text{ – з негативним самовирівнюванням.}$$

Перехідні характеристики таких ОК наведено на рис. 1.26.

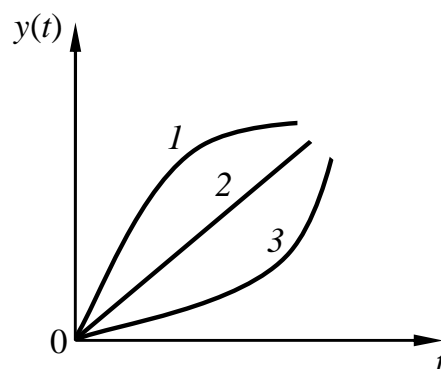


Рис. 1.26. Перехідні процеси в об'єктах: 1 – з позитивним самовирівнюванням; 2 – без самовирівнювання; 3 – з негативним самовирівнюванням

**Швидкодія об'єктів керування.** Швидкодія – це швидкість виникнення реакції (відклику) об'єкта на збурювальний вплив. Реакція об'єкта на стриб-



коподібне (східчасте) збурення може бути миттєвою (насправді, безінерційні об'єкти – це, швидше, теоретична абстракція) чи з деякою затримкою. Об'єкти, що мають значну розтягненість у часі реакції на згадане збурення називаються інерційними. Така затримка реагування може мати дві причини: інерційність об'єкта та наявність чистого (транспортного) запізнення.

*Чистим (транспортним) запізненням* називається час  $\tau$  від моменту завдання збурення до початку зміни керованого параметра. Це час, упродовж якого потік речовини чи енергії, що має швидкість  $v$ , долає відстань  $l$  від місця завдання збурення до місця, в якому вимірюється значення керованого параметра:  $\tau = l / v$  (рис. 1.27).

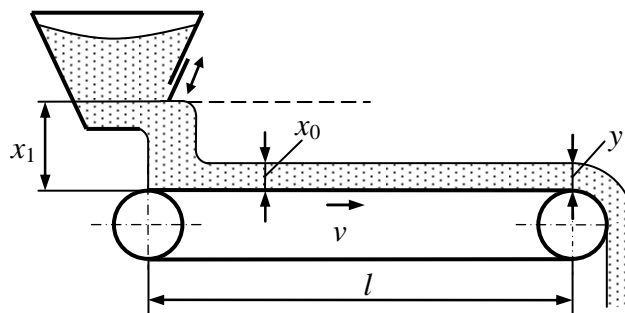


Рис. 1.27. Схема об'єкта з чистим (транспортним) запізненням

У цьому разі значення та форма вихідної величини залишається тою самою, що й у вхідної, а вигляд перехідних процесів, що відбуваються в об'єкті, наведено на рис. 1.28.

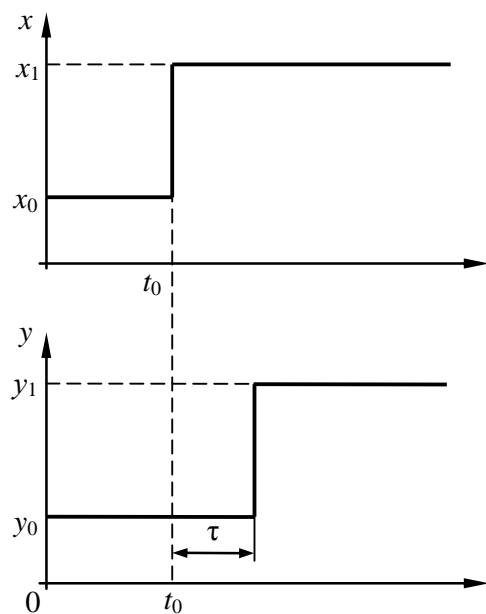


Рис. 1.28. Динамічна характеристика об'єкта з чистим (транспортним) запізненням

У багатоємнісних об'єктах (див., наприклад, рис. 1.21, в) запізнення зумовлено тим, що потік речовини чи енергії долає опори, які розділяють гідравлічні, теплові та інші акумулювальні ємності об'єкта, тому його називають ємнісним. *Інерційністю* або *ємнісним запізненням* об'єкта називають його властивість

приводити до поступової зміни вихідної величини після завдання східчастого збурювального впливу на вході. На рис. 1.29 показано порівняльні динамічні характеристики об'єктів без запізнення та об'єктів із ємнісним запізненням.

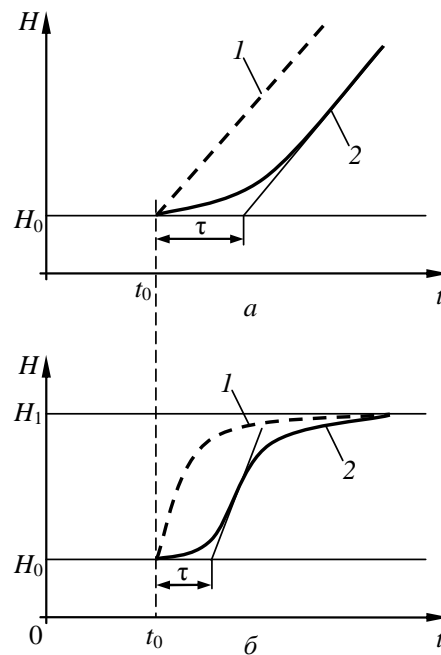


Рис. 1.29. Перехідні характеристики об'єктів:  
*a* – без самовирівнювання; *b* – з позитивним самовирівнюванням;  
 1 – без запізнення, 2 – з ємнісним запізненням

До кількісних характеристик інерційності об'єктів відносять: 1) тривалість перехідного процесу  $t_{\text{пр}}$ ; 2) стала часу  $T_0$ ; 3) чисте або ємнісне запізнення  $\tau$ .

Найбільш відомий критерій інерційності об'єктів із позитивним самовирівнюванням – стала часу  $T_0$ , визначення якої було наведено раніше (п. 2.2.3 Кн. 1). Математично вона являє собою коефіцієнт диференціального рівняння динаміки, яке для одноємнісного об'єкта, тобто для акумулювальної ємності, має вигляд

$$T_0 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t). \quad (1.16)$$

Характеристичним рівнянням диференціального рівняння (1.16) буде алгебричне

$$T_0 p + 1 = 0$$

з коренем

$$p = -1/T_0.$$

Таким чином, корінь характеристичного рівняння диференціального рівняння акумулювальної ємності – це від'ємна зворотна величина відносно її сталої часу  $T_0$ .

Для одноємнісних об'єктів без самовирівнювання як критерій швидкодії можна використовувати швидкість зміни вихідної величини  $y(t)$  після завдання збудження на вході:  $dy(t)/dt = v = \text{const}$  (див. рис. 1.22, б).

Для багатоемнісних ОК рівняння динаміки має такий вигляд:

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = \\ = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + x(t), \end{aligned}$$

а характеристичним буде алгебричне рівняння

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + 1 = 0,$$

корені якого можуть бути дійсними:

$$p_1 = -1/T_1; p_2 = -1/T_2; \dots; p_n = -1/T_n,$$

де  $T_1, T_2, \dots, T_n$  – сталі часу відповідних акумулювальних ємностей ОК (для неколивного об'єкта), або комплексними.

Для багатоемнісного об'єкта без самовирівнювання рівняння динаміки має такий вигляд:

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \frac{dy(t)}{dt} = \\ = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_2 \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \frac{dx(t)}{dt}, \end{aligned}$$

а характеристичне рівняння

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_2 p^2 + p = 0$$

має корені  $p_1 = 0; p_2 = -1/T_2; p_3 = -1/T_3; \dots; p_n = -1/T_n$  (для неколивного ОК).

Оцінювання інерційності таких ОК здійснюється аналогічно. Так само можна оцінювати швидкодію ОК з від'ємним самовирівнюванням.

Наостанок розглянемо, як виражається чисте запізнення в математичних виразах динамічних моделей ОК. Чисте запізнення  $\tau$  відображається у рівнянні динаміки як часовий зсув вхідної величини, тож рівняння динаміки для об'єктів чистого запізнення матимуть вигляд

$$y(t) = x(t - \tau) \quad (1.17)$$

для одноємнісного і

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t - \tau)$$

для багатоемнісного<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Чисте запізнення в ОК може поєднуватися з інерційністю, тоді рівняння динаміки (1.17) набуде вигляду  $T_0 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t - \tau)$ .

Передавальні функції цих об'єктів матимуть вигляд

$$W_n(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = e^{-p\tau}$$

та

$$W_n(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = \frac{k}{(a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + 1)} \cdot e^{-p\tau}.$$

**Методи отримання динамічних характеристик ОК.** Динамічні характеристики ОК можуть бути отримані аналітичними (розрахунковими) або експериментальними методами. Аналітичні – отриманням та розв'язанням рівняння динаміки, експериментальні – проведенням активного експерименту. Останні моделі більш точні, однак експериментальне моделювання має й свої вади:

- під час експерименту порушується нормальна робота ОК, позаяк на нього подають спеціальні збурювальні впливи;
- експериментальні моделі не відображають внутрішніх взаємозв'язків у об'єктах, які розглядаються як «чорна скринька»;
- експериментальні моделі описують лише конкретний об'єкт і не можуть бути перенесені на інші, навіть близькі за конструкцією та технологією, об'єкти керування, на відміну від більш універсальних аналітичних моделей.

Загалом кожен із наведених методів має свої як позитивні, так і негативні якості, тому метод моделювання слід вибирати залежно від можливості роботи з об'єктом, вимог до математичних моделей та способу подальшого їх застосування.

**Аналітичний метод отримання динамічних характеристик.** Для аналітичного моделювання динаміки об'єктів керування потрібно визначити межі цього об'єкта, його входи та виходи, а також внутрішню структуру і внутрішні взаємозв'язки в об'єкті (все це зображають схематично на розрахунковій схемі об'єкта).

Рівняння динаміки ємностей зазвичай отримують із рівнянь їх балансів у статичних режимах врахуванням акумуляції речовин чи енергії в ємності під час змін у часі її визначальних параметрів.

У сталому (статичному) режимі кількість акумульованої в об'єкті речовини чи енергії (кількісно вона характеризується значенням визначального параметра – в технологічному апараті це буде, наприклад, рівень або концентрація речовини, у печі – температура тощо) залишається постійною, а в динамічному – змінюється. Об'єкт моделювання може мати декілька акумулювальних ємностей, кожна з яких характеризується певним значенням визначального параметра чи параметра стану.

Математичний опис об'єкта моделювання в динамічному режимі пов'язаний із математичним описом його акумулювальних ємностей: порядок математичної моделі визначається кількістю ємностей в об'єкті, що моделюється.

Оскільки в динамічному режимі кількість акумульованої в ємностях речовини чи енергії, на відміну від статичного режиму, змінюється, то й балансні рівняння будуть не такими, як у статистиці:

$$\sum_{j=1}^m Q_{j_{\text{вх}}}(t) \neq \sum_{i=1}^n Q_{i_{\text{вих}}}(t),$$

а їх різниця, власне, й визначить кількість акумульованої речовини чи енергії.

Розглянемо одноємнісний об'єкт, розрахункову схему якого подано на рис. 1.30, де визначальним параметром (параметром стану) є  $y(t)$ , а кількість акумульованої в об'єкті речовини чи енергії –  $Q_a(t)$ .

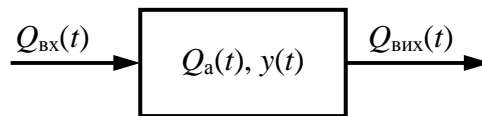


Рис. 1.30. Розрахункова схема одноємнісного ОК

Для такого об'єкта рівняння балансу в динамічному режимі матиме вигляд

$$Q_{\text{вх}}(t) - Q_{\text{вих}}(t) = Q_a(t).$$

Кількість акумульованої в ємності речовини чи енергії  $Q_a(t)$  можна виразити через визначальний параметр  $y(t)$ . За нескінченно малий час  $dt$  різницю між вхідними та вихідними потоками можна виразити так:

$$[Q_{\text{вх}}(t) - Q_{\text{вих}}(t)]dt = dQ_a(t) = k dy(t)$$

або

$$Q_{\text{вх}}(t) - Q_{\text{вих}}(t) = k \frac{dy(t)}{dt}. \quad (1.18)$$

Як видно з виразу (1.18), різниця між вхідними і вихідними потоками речовини чи енергії за одиницю часу пропорційна першій похідній визначального параметра (параметра стану) за часом. Коефіцієнт пропорційності  $k$  у цьому виразі визначає акумулювальну здатність ємності.

Наприклад, для заповненої рідиною проточної посудини (апарата, резервуара, цистерни, бака тощо) визначальним параметром є рівень рідини  $H$ . Якщо вона має по одному вхідному і вихідному потоку (рис. 1.23, а), то рівняння (1.18) для неї запишемо у такому вигляді:

$$Q_{\text{вх}}(t) - Q_{\text{вих}}(t) = F \frac{dH(t)}{dt}.$$

Як бачимо, акумулювальна здатність посудини для рідини зі зміною рівня  $H$  визначається площею її поперечного перерізу  $F$ .

Отримані таким чином рівняння динаміки акумулювальних ємностей з числовими коефіцієнтами можуть бути кінцевим продуктом моделювання, та досить часто з отриманих рівнянь динаміки акумулювальних ємнос-

тей – виключенням змінних, які в межах конкретної задачі не становлять інтересу, – отримують одне рівняння динаміки всього об’єкта. Воно пов’язує входи ОК із його виходами, а його порядок дорівнюватиме кількості врахованих акумулювальних ємностей в об’єкті.

Оскільки рівняння динаміки акумулювальних ємностей часто являють собою нелінійні диференціальні рівняння, то для подальшого використання їх доводиться лінеаризувати. Отримане аналітично рівняння динаміки акумулювальної ємності має вигляд

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = bx(t). \quad (1.19)$$

Змінні  $y(t)$ ,  $x(t)$ , а також коефіцієнти  $a_0$ ,  $a_1$  та  $b$  зазвичай мають певну розмірність.

Найбільш поширена форма подання цього рівняння у класичній теорії автоматичного керування (поряд із іншими формами, наприклад, безрозмірною) – узвичаєна форма запису, отримана діленням усіх складових рівняння (1.19) на коефіцієнт при вихідній змінній  $y(t)$ , тобто на  $a_0$ :

$$T_{об} \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t),$$

де  $T_{об} = a_1 / a_0$ ;  $k = b / a_0$ .

Коефіцієнти рівняння динаміки акумулювальної ємності, записаного у такій формі, набувають певного фізичного змісту:  $T_{об}$  – стала часу акумулювальної ємності має розмірність (dim) часу;  $k$  – коефіцієнт передачі об’єкта моделювання для каналу  $x \rightarrow y$ , має розмірність, яка узгоджує розмірності  $y$  та  $x$ . Оскільки у статистиці  $x$  і  $y$  мають сталі значення, то  $dy/dt$  дорівнюватиме нулю, звідки

$$y = kx,$$

де  $k = y / x$ .

А отже,  $\dim k = \dim y / \dim x^4$ .

Тож хоча коефіцієнт  $k$  і входить у рівняння динаміки об’єкта моделювання (ємності), але радше характеризує статичну залежність виходу  $y$  від входу  $x$ .

Створимо математичну модель динаміки технологічного апарата, схему якого наведено на рис. 1.20, *a*. Якщо в процесі роботи об’єм апарата вважати незмінним, а витрата теплоносія, що входить в апарат, дорівнюватиме витраті, яка виходить з нього, то, скориставшись виразом (1.12), рівняння елементарного теплового балансу такого апарата (для проміжку часу  $dt$ ) можна в першому наближенні записати так:

$$[Qc\theta^{вх} - Qc\theta - kF(\theta - \theta^{н.с})]dt = d(Gc\theta),$$

де  $t$  – час;  $dt$  – диференціал (нескінченний малий приріст) часу;  $G$  – кількість теплоносія;  $d(Gc\theta)$  – диференціал від кількості тепла в апараті. У квад-

<sup>4</sup> dim – розмірність (від англ. *dimension* – розмір).

ратних дужках лівої частини цього рівняння наведено баланс надходження та витрати тепла в апараті за одиницю часу.

Після нескладних перетворень отримаємо:

$$Gc \frac{d\theta}{dt} + (Qc + kF)\theta = Qc\theta^{\text{BX}} + kF\theta^{\text{H.C}}. \quad (1.20)$$

Ми вважали, що  $G$  і  $c$  від часу не залежать.

У диференціальному рівнянні (1.20) один з коефіцієнтів можна прирівняти до одиниці (поділивши всі члени рівняння на нього). Хай це буде коефіцієнт при  $\theta$ :

$$T \frac{d\theta}{dt} + \theta = k_{\text{BX}}\theta^{\text{BX}} + k_{\text{H.C}}\theta^{\text{H.C}}, \quad (1.21)$$

де  $T = \frac{Gc}{Qc + kF}$ , а коефіцієнти  $k_{\text{BX}}$  і  $k_{\text{H.C}}$  візьмемо з моделі статички (1.13).

Можливий і такий варіант запису:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{Qc\theta^{\text{BX}} + kF\theta^{\text{H.C}} - (Qc + kF)\theta}{Gc}. \quad (1.22)$$

Це так звана канонічна форма. Об'єкт, який описується диференціальним рівнянням (1.21) або (1.22), структурно можна подати так, як показано на рис. 1.20, б.

Розглянемо рівняння (1.21) в статичному (базовому) режимі. Статичний режим означає, що стан об'єкта з часом не змінюється, отже всі похідні за часом від усіх вхідних і вихідних сигналів в об'єкті дорівнюють нулю, тож диференціальне рівняння (1.21) в статичному режимі набуде такого вигляду:

$$\theta^* = k_{\text{BX}}\theta^{\text{BX}*} + k_{\text{H.C}}\theta^{\text{H.C}*}, \quad (1.23)$$

де індекс \* вказує на статичне значення відповідної змінної.

Подамо тепер у рівнянні (1.23) змінні так:

$$\begin{cases} \theta^* = \theta^* + \Delta\theta; \\ \theta^{\text{BX}} = \theta^{\text{BX}*} + \Delta\theta^{\text{BX}}; \\ \theta^{\text{H.C}} = \theta^{\text{H.C}*} + \Delta\theta^{\text{H.C}}, \end{cases} \quad (1.24)$$

де  $\Delta\theta$ ,  $\Delta\theta^{\text{BX}}$ ,  $\Delta\theta^{\text{H.C}}$  – прирости (щодо статичних значень) змінних  $\theta$ ,  $\theta^{\text{BX}}$ ,  $\theta^{\text{H.C}}$ .

Підставимо змінні з (1.24) в (1.21), отримаємо:

$$T \frac{d\Delta\theta}{dt} + \theta^* + \Delta\theta = k_{\text{BX}}\theta^{\text{BX}*} + k_{\text{BX}}\Delta\theta^{\text{BX}} + k_{\text{H.C}}\theta^{\text{H.C}*} + k_{\text{H.C}}\Delta\theta^{\text{H.C}}. \quad (1.25)$$

Віднявши почленно рівняння (1.23) від (1.25), матимемо остаточно:

$$T \frac{d\Delta\theta}{dt} + \Delta\theta = k_{\text{вх}} \Delta\theta^{\text{вх}} + k_{\text{н.с}} \Delta\theta^{\text{н.с}}. \quad (1.26)$$

Рівняння (1.26) – це рівняння, записане в приростах змінних.

Звернемо увагу на те, що структура рівняння (1.26) виявилася такою самою, як і структура рівняння (1.21). Це взагалі характерно для лінійних диференціальних рівнянь. Лінійне рівняння залишається справедливим як у разі, коли мова йде як про «абсолютні» значення змінних, так і про їх прирости. Враховуючи цю обставину, надалі записуватимемо лінійні диференціальні рівняння у формі (1.21), маючи на увазі форму (1.26), тобто формально вилучатимемо значок  $\Delta$  у рівняннях у формі приростів.

Коли за початковий стан об'єкта, описаного диференціальним рівнянням (1.26), беремо статичний режим, то прирости його змінних ( $\theta$ ,  $\theta^{\text{вх}}$ ,  $\theta^{\text{н.с}}$ ) щодо цього статичного режиму будуть, зрозуміло, нульовими. Це якраз і є так звані «нульові початкові умови», про які вже не раз згадувалося.

Якщо припустити, що, наприклад, на якомусь інтервалі часу приріст  $\Delta\theta^{\text{вх}} = 0$ , то диференціальне рівняння (1.26) зведеться до

$$T \frac{d\Delta\theta}{dt} + \Delta\theta = k_{\text{н.с}} \Delta\theta^{\text{н.с}}. \quad (1.27)$$

Аналогічно за  $\Delta\theta^{\text{н.с}} = 0$  матимемо:

$$T \frac{d\Delta\theta}{dt} + \Delta\theta = k_{\text{вх}} \Delta\theta^{\text{вх}}. \quad (1.28)$$

Диференціальне рівняння (1.27) описує динамічні властивості каналу « $\theta^{\text{вх}} \rightarrow \theta$ » (канал керування), тоді як (1.28) – каналу « $\theta^{\text{н.с}} \rightarrow \theta$ » (канал збурення). Отже, канал позначається вхідним і вихідним сигналами, між якими – стрілкою – фіксується причинно-наслідковий зв'язок.

Відповідно, можна записати передавальні функції названих каналів:

$$W_{\theta^{\text{вх}} \rightarrow \theta}(p) = \frac{k_{\text{вх}}}{Tp + 1}, \quad W_{\theta^{\text{н.с}} \rightarrow \theta}(p) = \frac{k_{\text{н.с}}}{Tp + 1}.$$

Характер перехідних процесів у цих каналах показано на рис. 1.31, а, б.

Рівняння (1.18), (1.27), (1.28) називаються рівняннями динаміки акумулювальної ємності або одноємнісного об'єкта. Рівняння динаміки кожної окремої ємності є диференціальними рівняннями першого порядку. Багатоємнісні об'єкти в динаміці описують системою із  $n$  диференціальних рівнянь першого порядку або диференціальним рівнянням  $n$ -го порядку, де  $n$  – кількість акумулювальних ємностей у об'єкті моделювання. Перехідні процеси в одно- і багатоємнісних об'єктах керування відрізняються виглядом початкової ділянки графіка (рис. 1.31, в).

**Експериментальні методи отримання динамічних характеристик.** Як і експериментальні методи отримання математичних моделей



загалом, методи отримання динамічних характеристик поділяються на детерміновані (закономірні) та статистичні (ймовірнісні).

*Детерміновані методи* отримання динамічних моделей ґрунтуються на передумові існування закономірного зв'язку між вихідними та вхідними параметрами в об'єкті моделювання. Детерміновані методи поділяються на метод часових характеристик та частотний метод.

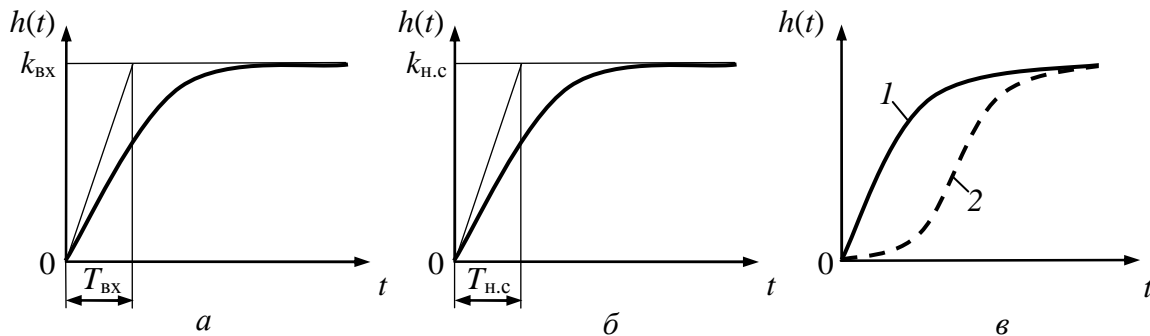


Рис. 1.31. Графіки перехідних процесів: *а* – у каналах керування; *б* – у каналах збурення; *в* – у об'єктах керування: *1* – одноємнісному, *2* – багатоемнісному

*Статистичні методи* отримання динамічних характеристик ґрунтуються на передумові наявності випадкових взаємодій входів та виходів в об'єкті моделювання або зашумлення входів та виходів об'єкта випадковими величинами. Методи статистичної динаміки, як і статистичної статистики, можна розділити на методи активного та пасивного експериментів.

Крім суто експериментальних методів отримання динамічних характеристик, використовують *експериментально-аналітичний метод*, що, як і аналітичний у статистиці, ґрунтується на отриманні структури моделі аналітичним методом, а її параметрів (коефіцієнтів) – експериментальним методом.

Останнім часом у зв'язку з поширенням застосування КЕОМ на виробництві набули досить значного поширення методи поточної ідентифікації, націлені на наближення (адаптацію) властивостей математичних моделей об'єктів керування властивостям самих об'єктів у процесі їх експлуатації перед використанням моделей в алгоритмах.

*Метод часових характеристик.* Цей метод – найбільш поширений експериментальний детермінований метод отримання динамічних характеристик виробничих об'єктів керування. Він ґрунтується на дослідженні поведінки (реакції) об'єкта моделювання у часі після завдання одноразового збурювального впливу. Залежно від форми збурення, що подається на об'єкт моделювання, метод часових характеристик поділяється на такі методи:

- перехідних характеристик;
- імпульсних характеристик;
- хвильових імпульсних характеристик.

Можливе також використання часових характеристик, отриманих як реакція об'єкта моделювання на збурення неправильної форми.

Дослідження динамічних властивостей об'єктів моделювання *методом перехідних характеристик* передбачає подавання на вхід таких об'єктів одноразового збурення ступінчастої (стрибкоподібної) форми. Як уже зазначалося, записану в часі реакцію об'єкта на таке збурення називають кривою розгону. Для теоретичних досліджень об'єктів та систем керування часто використовують одиничне ступінчасте збурення, тобто ступінчасту зміну вхідної функції з величиною (амплітудою), що дорівнює одиниці. Записану в часі реакцію об'єкта на таке збурення називають перехідною характеристикою. Для практичного використання під час дослідження як об'єктів, так і систем керування одиничне ступінчасте збурення переважно незручне, оскільки в одних випадках воно може бути замалим, а в інших – надто великим. Тому на практиці використовують ступінчасте збурення такої величини (амплітуди), яка є достатньо чутливою для об'єкта дослідження і, разом з тим, яку можна дозволити (зазвичай вона становить 5...10 % від початкового сталого числового значення змінюваного параметра).

Експериментальне отримання динамічних характеристик методом перехідних характеристик охоплює такі операції: отримання і первинну обробку експериментальних даних (згладжування, нормування, відбракування) та апроксимацію оброблених таким чином експериментальних даних.

*Метод імпульсних характеристик* відрізняється від методу перехідних характеристик формою збурювального впливу. В цьому разі збурення являє собою імпульс, тобто два однакові за величиною ступінчасті збурення різного знака, виконані через деякий час  $\Delta t$ . Якщо  $\Delta t$  буде меншим, аніж тривалість  $t_{\text{пр}}$  перехідного процесу в об'єкті моделювання, то відхилення вихідної величини імпульсної характеристики під час експерименту буде менше, ніж у разі визначення перехідних характеристик для однакових амплітуд збурень. Це суттєва перевага методу імпульсних характеристик порівняно з методом перехідних характеристик. Недолік цього методу – більша складність проведення експерименту, а також оброблення його результатів.

Визначення динамічних властивостей об'єктів керування методом імпульсних характеристик менш поширене, ніж методом перехідних характеристик. Цей метод, фактично, використовують тоді, коли використання методу перехідних характеристик стає неможливим через неприпустимо велике відхилення вихідної величини під час експерименту.

*Метод хвильових імпульсних характеристик* дає змогу провести експеримент із ще меншим, ніж у разі визначення імпульсних характеристик, відхиленням вихідної величини. Під час експериментального отримання хвильових імпульсних характеристик збурення подається у вигляді хвильового імпульсу, що являє собою зсунуті на час  $\Delta t$  два імпульси різних знаків, або, що те саме, три ступінчасті збурення, середнє з яких має здвоєну амплітуду. Експериментальне отримання та оброблення хвильових імпульсних характе-

ристик будуть ще складнішими, ніж у разі імпульсних характеристик. З огляду на це хвильові імпульсні характеристики використовують лише тоді, коли неможливе застосування перехідних чи імпульсних характеристик.

Методи часових характеристик дають змогу отримати динамічну модель об'єкта керування найбільш просто, що становить їх вагому перевагу над іншими методами. Вада цих методів – досить реальна можливість отримання помилкових результатів за рахунок наявності неврахованих (непомічених) збурень об'єкта моделювання під час проведення експерименту. Способи усунення цих вад є, але вони ускладнюють ці методи.

#### **1.4.5. Приклад аналітичного моделювання статички та динаміки об'єкта керування**

Об'єктом моделювання буде технологічний апарат із регульованим рівнем рідини в ньому. Об'єкти з регульованим рівнем рідини можна поділити на групи, які відрізняються між собою фізичною природою або вихідними параметрами:

- апарати відкриті та сполучені з атмосферою, в яких виходами є подача та відведення рідини;
- апарати під тиском з такими самими виходами;
- апарати, в яких рівень підтримується упарюванням рідини (випарники);
- апарати, в яких регулюється рівень поділу фаз (розділювальні посудини або воронки) тощо.

Кожен із наведених об'єктів має певну специфіку керування, інерційність. Як об'єкти керування вони значно відрізняються один від одного, однак мають і спільні ознаки, характерні для об'єктів з регульованим рівнем. Розглянемо особливості таких об'єктів на прикладі найпростішого об'єкта керування, що належить до першої групи наведеної класифікації.

Розрахункову схему такого об'єкта зображено на рис. 1.32 [23].

Згідно з наведеною схемою об'єкт керування має одну акумулювальну ємність. Упарювання речовини не відбувається або його можна не брати до уваги. Виходячи з цих міркувань, запишемо рівняння статички, котрим у цьому разі є рівняння матеріального балансу:

$$Q_1 - Q_2 = 0, \quad (1.29)$$

де  $Q_1$  – масове надходження рідини в апарат;  $Q_2$  – масова витрата рідини з апарата.

Витрати  $Q_1$  та  $Q_2$  можна виразити через відкриття регульовальних органів на вході та виході. Якщо  $m$  та  $l$  – відносні відкриття клапанів на вході та виході, то витрати  $Q_1$  для зануреного в рідину трубопроводу та  $Q_2$  можна показати у такому вигляді (для лінійних витратних характеристик):

$$Q_1 = C_{V1} m \sqrt{P_1 + (h - H)\rho}; \quad (1.30)$$

$$Q_2 = C_{V2} l \sqrt{H\rho - P_2}, \quad (1.31)$$

де  $C_{V1}$  та  $C_{V2}$  – коефіцієнти витрати;  $P_1$  та  $P_2$  – напір рідини відповідно на вході в об'єкт та виході з нього;  $h$  та  $H$  – рівні;  $\rho$  – густина рідини.

З урахуванням виразів (1.30) та (1.31) рівняння (1.29) набуде такого вигляду:

$$C_{V1} m \sqrt{P_1 + (h - H)\rho} - C_{V2} l \sqrt{H\rho - P_2} = 0. \quad (1.32)$$

Рівняння (1.32) є рівнянням статичного режиму цього об'єкта керування. Воно пов'язує основні параметри, які визначають статичний режим ємності. Із цього рівняння з урахуванням акумуляції рідини в ємності можна записати рівняння динаміки об'єкта керування:

$$C_{V1} m \sqrt{P_1 + (h - H)\rho} - C_{V2} l \sqrt{H\rho - P_2} = F\rho \frac{dH}{dt}, \quad (1.33)$$

де  $F$  – площа поперечного перерізу апарата.

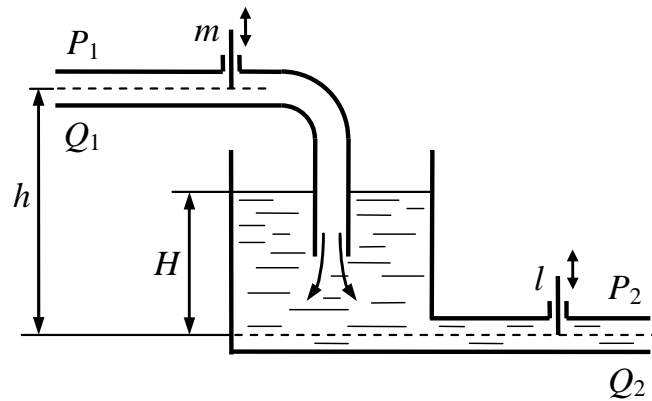


Рис. 1.32. Розрахункова схема апарата з регульованим рівнем рідини як об'єкта керування

У рівнянні (1.33) змінними можуть бути всі параметри, крім  $C_{V1}$  та  $C_{V2}$ . Однак в більшості випадків у схожих об'єктах керування змінними є  $H$ ,  $m$ ,  $l$ , та  $P_2$ . Для спрощення розгляду змінними вважатимемо тільки вказані параметри. Рівняння (1.33) навіть з урахуванням прийнятого спрощення – нелінійне диференціальне рівняння. Лінеаризацією розкладанням у ряд Тейлора рівняння (1.29) знайдемо його лінійне наближення:

$$C_{V1} \sqrt{P_1 + (h - H)\rho} \Delta m - \frac{C_{V1} m \rho}{2\sqrt{P_1 + (h - H)\rho}} \Delta H - C_{V2} \sqrt{H\rho - P_2} \Delta l - \frac{C_{V2} l \rho}{2\sqrt{H\rho - P_2}} \Delta H + \frac{C_{V2} l}{2\sqrt{H\rho - P_2}} \Delta P_2 = F\rho \frac{dH}{dt},$$

або

$$T \frac{d\Delta H}{dt} + \Delta H = K_1 \Delta m - K_2 \Delta l + K_3 \Delta P_2,$$

де

$$T = \frac{F\rho}{B}; \quad B = \frac{C_{V1}m\rho}{2\sqrt{P_1 + (h-H)\rho}} + \frac{C_{V2}l\rho}{2\sqrt{H\rho - P_2}};$$

$$K_1 = \frac{C_{V1}\sqrt{P_1 + (h-H)\rho}}{B}; \quad K_2 = \frac{C_{V2}\sqrt{H\rho - P_2}}{B}; \quad (1.34)$$

$$K_3 = \frac{C_{V2}l}{2B\sqrt{H\rho - P_2}}.$$

Якщо регулювальні органи на вході та виході розгляданого апарата підібрані правильно, то відносні відкриття їх  $m$  та  $l$  у будь-якому статичному режимі будуть однаковими, тобто для статички  $m = l = 1$ , тоді, як випливає з виразів (1.32) та (1.34),  $K_1 = K_2$ . Якщо відносні відкриття регулювальних органів у статисти будуть різними (у разі невідповідності регулювальних органів на вході та виході), рівність коефіцієнтів  $K_1$  та  $K_2$  дотримуватись не буде.

Розглянемо фактори, які впливають на регульованість рівня рідини в апараті. Основними параметрами, які визначають регульованість, є стала часу  $T$  та коефіцієнт самовирівнювання, що дорівнює  $1/K_1$ ,  $1/K_2$  або  $1/K_3$  (залежно від досліджуваного каналу впливу).

Інерційність ємності, що визначається сталою часу  $T$ , може бути виражена так (див. (1.34)):

$$T = \frac{F\rho}{B} = \frac{F\rho}{\frac{C_{V1}m\rho}{2\sqrt{P_1 + (h-H)\rho}} + \frac{C_{V2}l\rho}{2\sqrt{H\rho - P_2}}}.$$

Взявши до уваги рівняння (1.30) та (1.31), можна записати

$$T = \frac{F}{\frac{C_{V1}^2 m^2}{2Q_1} + \frac{C_{V2}^2 l^2}{2Q_2}},$$

припускаючи ж у статисти однаковість витрат  $Q_1 = Q_2$  та ступенів відкриття регулювальних органів  $m = l$  (див. (1.29)), отримаємо:

$$T = \frac{2FQ_1}{C_{V1}^2 m^2 + C_{V2}^2 l^2} = \frac{2FC_{V1}\sqrt{P_1 + (h-H)\rho}}{m(C_{V1}^2 + C_{V2}^2)}. \quad (1.35)$$

З виразу (1.35) випливає, що інерційність досліджуваного об'єкта керування прямо пропорційна площі поперечного перерізу  $F$  й обернено пропорційна ступеням відкривання регулювальних органів  $m$  та  $l$  і коефіцієнтам витрат  $C_{V1}^2$  і  $C_{V2}^2$ , тобто у кінцевому підсумку – відповідним витратам.

Коефіцієнт самовирівнювання об'єкта керування може бути подано так:

$$A_1 = \frac{B}{C_{V1}\sqrt{P_1 + (h - H)\rho}} = \left( \frac{C_{V1}^2 m^2}{2Q_1} - \frac{C_{V2}^2 l^2}{2Q_2} \right) \frac{m\rho}{Q_1}.$$

З урахуванням того, що в статиці  $Q_1 = Q_2$  та  $m = l$ , отримаємо:

$$A_1 = \frac{(C_{V1}^2 + C_{V2}^2)m^3\rho}{2Q_1^2} = \frac{(C_{V1}^2 + C_{V2}^2)m^3\rho}{2C_{V1}^2 m^2 [P_1 + (h - H)\rho]}.$$

Коефіцієнт самовирівнювання такого об'єкта керування прямо пропорційний густині рідини та ступеню відкривання регулювального органу в статичному режимі, у межах якого відбуваються перехідні процеси за автоматичного регулювання, й обернено пропорційний перепадові тиску на регулювальному органі.

Аналогічний математичний опис і дослідження можна використати й для інших об'єктів керування з регульованим рівнем.

Самовирівнювання, як уже зазначалось, – наслідок дії зворотних зв'язків в об'єкті керування, тобто впливу регульованої величини на фізичні входи та виходи. Для розгляданого об'єкта моделювання зворотними зв'язками є зворотний вплив зміни рівня в апараті на вхідний та вихідний потоки. З огляду на це можна стверджувати, що в об'єкті є від'ємні зворотні зв'язки, які діють на вхідний та вихідний потоки.

Взаємозв'язок  $Q_1$  та  $Q_2$  з регульованою величиною  $H$  описано виразами (1.30) та (1.31).

Розглянемо зворотний зв'язок на вхідному потоці. Припустимо, що ступінь відкривання клапана  $m$  на вхідному потоці (рис. 1.32) змінився, наприклад, збільшився на  $\Delta m$ . Це спричинить збільшення витрати  $Q_1$  та рівня  $H$ . Підвищення рівня призведе до зменшення перепаду тиску на вхідному клапані, а отже, до поступового зменшення витрати  $Q_1$ . Збільшення ступеня відкривання вихідного клапана  $l$ , згідно з рівнянням (1.31), пов'язано зі збільшенням  $Q_2$ , що призводить до зниження рівня  $H$ . Зниження рівня  $H$  зменшить перепад тиску на вихідному клапані та витрату  $Q_2$  (див. (1.31)).

Отже, будь-яке збурення цього об'єкта призводить до зміни рівня  $H$ . Зворотні зв'язки забезпечують поступове зменшення швидкості цієї зміни.

#### 1.4.6. Використання математичної моделі об'єкта керування в режимі датчика

Математична модель об'єкта керування (в цьому разі ним найчастіше є технологічний процес або окрема його стадія) пов'язує між собою у формалізованому вигляді вихідні та вхідні параметри об'єкта керування. Потреба у використанні моделі замість ПВП виникає, коли з певних причин деякі з керованих параметрів (найчастіше це якісні показники процесів) не можна виміряти. З огляду на це виміряні значення цих параметрів замінюють прогнозованими, отриманими реалізацією математичної моделі засобами мікропроцесорної техніки, що входять до складу системи керування.

Розглянемо принципи функціонування математичної моделі в такому (вимушеному) режимі на прикладі виробництва амофосу – поширеного фосфорного мінерального добрива (рис. 1.33).

Амофос отримують із фосфорної кислоти та аміаку, сполучаючи їх у реакторі, у якому перебігає реакція нейтралізації (не повна) з утворенням кислого середовища з  $\text{pH} \approx 5,3$ . Залишки плавикової кислоти, що є у фосфорній кислоті, руйнують мембранне скло електродів рН-метра, тому для визначення (прогнозування) значення рН застосовують розроблену математичну модель об'єкта керування. Побудуємо модель, яка дала б змогу прогнозувати рН у виробленому амофосі.

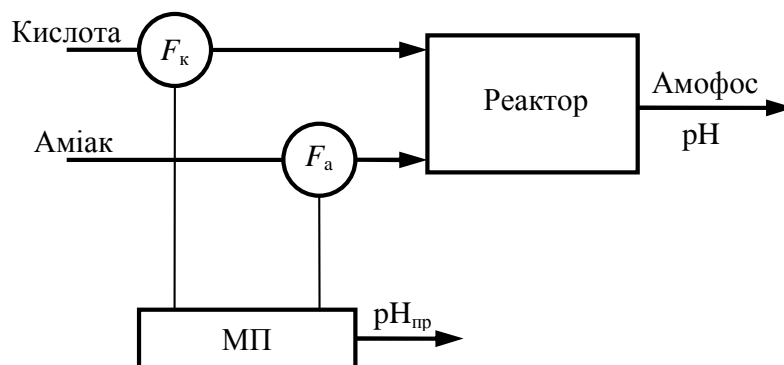


Рис. 1.33. Приклад використання математичної моделі в режимі датчика у виробництві амофосу

На величину рН на виході з реактора впливають певні чинники:

$$\text{pH} = (F_a, F_k, C_k, t_a, t_k, t_c),$$

де  $F_a, F_k$  – витрати аміаку та кислоти;  $C_k$  – концентрація кислоти;  $t_a, t_k, t_c$  – температури аміаку, кислоти та навколишнього середовища.

Математичну модель створювали експериментально із застосуванням методу планування експерименту, тому вона справедлива лише для конкретного об'єкта і тільки в межах досліджених значень її параметрів, хоча структура моделі більш універсальна.

Як виявилось, температурні показники потоків і довкілля мають слабкий вплив на вихідну величину (рН), тому їх можна вилучити з моделі. Концентрація кислоти  $C_k$ , хоча й дуже сильно впливає на рН, однак її теж потрібно вилучити, оскільки, наприклад, її теж не можна виміряти (тоді для зменшення впливу  $C_k$  її, по можливості, слід стабілізувати).

Отже, у моделі залишилося два впливові параметри:

$$pH = (F_a, F_k).$$

Для вибраних діапазонів змінювання витрат  $\Delta F_a$ ,  $\Delta F_k$  можна обрати таку структуру моделі:

$$pH_{пр} = pH_0 \pm k_1 \Delta F_a \pm k_2 \Delta F_k \pm k_3 \Delta F_a \Delta F_k,$$

де  $pH_{пр}$  – прогнозоване значення рН;  $pH_0 = 5,3$  – номінальне значення рН;  $k_1, k_2, k_3$  – коефіцієнти моделі.

За вимірними значеннями витрат  $F_a$  та  $F_k$ , реалізуючи розроблену модель, можна прогнозувати величину рН на виході реактора. Прогнозоване значення  $pH_{пр}$  залишатиметься правильним доти, доки невраховані чинники будуть незмінними та дорівнюватимуть значенням, які вони мали під час експерименту.

Зміна значень неврахованих чинників погіршуватиме точність моделі, тобто спрогнозоване значення  $pH_{пр}$  відрізнятиметься від дійсного. За таких умов модель належить перевірити щодо адекватності, порівнюючи значення, отримані через реалізацію моделі  $pH_{пр}$  з дійсними значеннями  $pH_d$ , отриманими за допомогою лабораторних вимірювань. Умову адекватності можна записати так:

$$pH_{пр} - pH_d \leq \varepsilon,$$

де  $\varepsilon$  – задане значення допустимої похибки.

Якщо отримані результати не задовольняють умову адекватності, модель піддають адаптації, у процесі якої за допомогою спеціально розробленого алгоритму, що вводиться в дію оператором, знаходять нові значення коефіцієнтів  $k_1, k_2$  та  $k_3$ .

## 1.5. АЛГОРИТМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ Й АВТОМАТИЧНІ РЕГУЛЯТОРИ

Керування у широкому розумінні – це дії (їх сукупність і послідовність), спрямовані на досягнення певної мети. Коли ви ложкою набираєте борщ із тарілки, то керуєте своєю рукою, намагаючись (мета) донести ложку до рота. Зазвичай ви це робите, не задумуючись, як то кажуть, «на автоматі», тому практично це вже автоматичне керування. Ставити мету, розробляти і реалізовувати алгоритм її досягнення – це переважно асоціюють із діяльністю живих істот. І байдуже, що ці істоти можуть не здогадуватись про те, що вони реалізують процес керування. Ну, а яку мету ставить перед



собою автоматичний регулятор у системі автоматичного керування? Сам по собі регулятор – ніякої, але розробник системи, навпаки, ставить її і перед собою, і перед регулятором як засобом реалізації поставленої ним (розробником) мети.

Найчастіше в процесі керування перед автоматичним регулятором ставлять одне з таких завдань:

- стабілізація (підтримання на заданому рівні) регульованої величини;
- відслідковування якоїсь величини, що може змінюватись непередбачувано;
- зміна регульованої величини відповідно до певної наперед заданої програми.

Стабілізація, наприклад, має забезпечити підтримування потрібної частоти струму в електромережі, витримування заданого напрямку та висоти польоту літака в межах виділеного «коридору», підтримування параметрів пари на виході з котлоагрегату та інше.

Відслідковуванням постійно займаються військові, наприклад, радіолокатор «веде» ціль, а керовані ним гармати повертаються, відслідковуючи всі еволюції швидкої маневреної цілі. Але таке слідкування не дивина й у суто мирних ситуаціях: наприклад, в реактор подають два потоки різних речовин і потрібно підтримувати певне співвідношення між ними, при цьому один з потоків «веде» («ціль»), а другий («радіолокатор») – керований регулятором – має відслідковувати всі його зміни.

Програмне керування, зокрема, застосовують у хімічних реакторах періодичної дії, де потрібно послідовно завантажити реагенти, закрити кришку, перемішати реагенти, підігріти (подекуди у певному часовому ритмі) реакторну масу до заданої температури, витримати заданий час, потім чогось долити, ще потримати, відтак охолодити тощо. Тобто є відповідна програма (послідовність дій), яку потрібно реалізувати, щоб отримати певний продукт та ще й відповідної якості.

Для розв'язання цих, а також інших задач керування (більш повний перелік видів керування наведено в п. 1.1.1 Кн. 1) можна застосовувати різні стратегії (принципи) керування. Очевидно, краще випереджати «противника»: збурення ще тільки збирається вчинити «напад» на об'єкт керування, а ми його вже «врахували» і вжили відповідних заходів. Це – регулювання за збуренням (причому зовсім не обов'язково чекати до виникнення власне збурення, можна врахувати тенденції (похідні) його поведінки наперед). Детальніше про особливості застосування цього принципу регулювання йтиметься в підрозд. 3.1.

Друга стратегія – це регулювання (або керування) за відхиленням (див. підрозд. 3.1): немає відхилення регульованого параметра від його заданого значення – і з боку регулятора жодних дій, з'явилося – регулятор швидко оцінює його (якої величини, якого знаку, як швидко зростає) – і починає діяти так, щоб скомпенсувати це відхилення бодай частково, адже відразу й повністю зазвичай не виходить. Якщо для реалізації першої стратегії

замикати систему керування не було потреби, то тут замикання реалізується автоматично: з'явилось відхилення – регулятор відреагував, відхилення, в свою чергу, реагує на його реакцію, і так далі – по колу.

Тактика регулювання (алгоритм поведінки регулятора) за відхиленням також може бути різною. Зазвичай цей алгоритм називають *законом регулювання*. Розглянемо ті з них, які найчастіше використовують у промислових регуляторах.

**Регулятори з лінійними законами регулювання.** Вони реалізують алгоритми регулювання вигляду

$$\mu = C_1 \varepsilon + C_2 \int_0^t \varepsilon dt + C_3 \frac{d\varepsilon}{dt},$$

де  $C_1, C_2, C_3$  – параметри налагодження регулятора;  $t$  – час.

Першу складову правої частини наведеного рівняння називають пропорційною або П-складовою, другу – інтегральною або І-складовою, а третю – диференціальною або Д-складовою. Залежно від наявності їх у законі регулювання відповідно поділяють і самі регулятори.

*П-закон.* Регулятор, що його реалізує, називають пропорційним або *П-регулятором*. Якщо  $\mu$  – вихід регулятора, а  $\varepsilon$  – вхід, то алгоритм його роботи, тобто алгоритм формування регулювального впливу, можна записати у вигляді

$$\mu = k_p \varepsilon, \quad (1.36)$$

де  $k_p$  – коефіцієнт передачі регулятора (параметр налагодження П-регулятора).

Передавальна функція такого регулятора

$$W_{\text{П-рег}}(p) = k_p.$$

На рис. 1.34 показано перехідну характеристику регулятора в ідеалізованому вигляді.

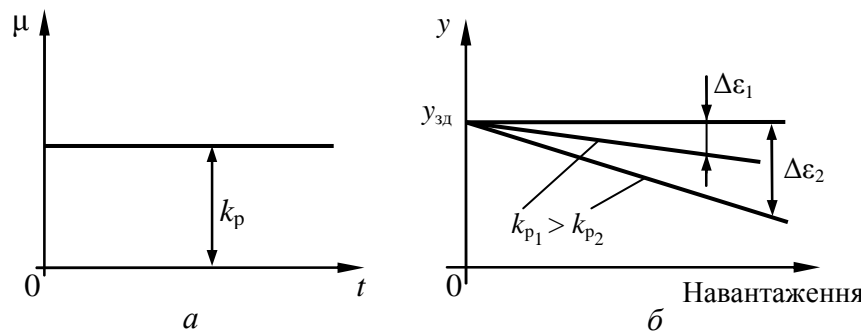


Рис. 1.34. Пропорційний регулятор: *a* – перехідна характеристика ідеального П-регулятора; *б* – залежність статичної похибки  $\Delta\varepsilon$  реального П-регулятора від  $k_p$  та навантаження

Системам керування з пропорційним регулятором властива неусувна (див. підрозд. 1.9) статична похибка  $\Delta\varepsilon = 1 / k_p$  (її також називають залишковою нерівномірністю) – тому цей регулятор ще називають *статичним*. Для зменшення  $\Delta\varepsilon$  необхідно збільшувати  $k_p$ , однак це може призвести до втрати системою керування стійкості. Величина  $\Delta\varepsilon$  залежить також від навантаження (рис. 1.34, б), тому в разі використання П-регулятора не слід припускати значних коливань навантаження.

Значення параметра налагодження П-регулятора  $k_p$  також значною мірою впливають на характер перехідних процесів у системах керування з П-регулятором (рис. 1.35). Як видно з рисунка, зі збільшенням коефіцієнта передачі  $k_p$  статична похибка регулювання зменшується ( $\Delta\varepsilon_1 \dots \Delta\varepsilon_5$ ), однак у системі посилюється схильність до коливального характеру перехідних процесів (криві 2...5) і зростає амплітуда коливань, що врешті-решт може призвести до втрати такою системою стійкості.

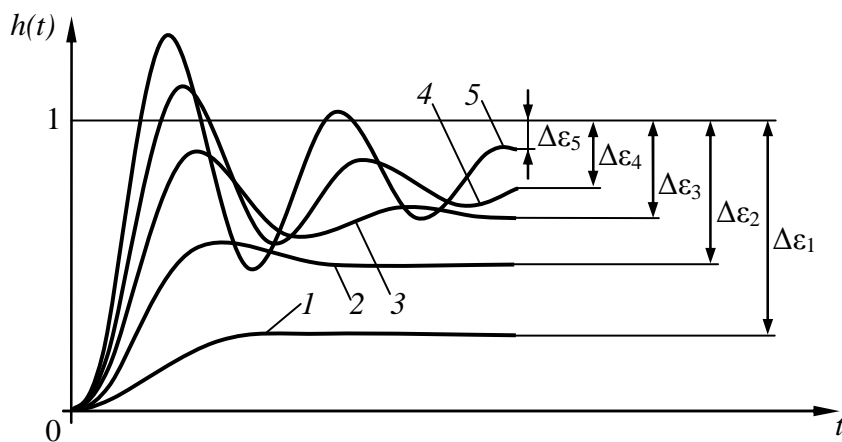


Рис. 1.35. Вигляд перехідних процесів у об'єкті керування для різних значень  $k_p$  П-регулятора:  
 $1 - k_p = 0,5$ ;  $2 - k_p = 1$ ;  $3 - k_p = 2$ ;  $4 - k_p = 3$ ;  $5 - k_p = 4$

*I-закон.* Регулятор, що реалізує цей алгоритм називають інтегральним або *I-регулятором* (його ще називають *астатичним*, як і інші регулятори, здатні звести статичну похибку регулювання до нуля) формує регулювальний вплив  $\mu$  пропорційно інтегралу від величини відхилення  $\varepsilon$ :

$$\mu = \frac{k_p}{T_i} \int_0^t \varepsilon dt, \quad (1.37)$$

де  $T_i$  – стала часу регулятора або час інтегрування (параметр налагодження I-регулятора).

Передавальна функція інтегрального регулятора

$$W_{I\text{-per}}(p) = \frac{k_p}{T_i p},$$

а перехідний процес має вигляд, як на рис. 1.36.

I-регулятори завжди намагаються звести похибку регулювання до нуля, оскільки вони можуть перебувати у зрівноваженому стані лише тоді, коли регульована величина дорівнює заданому її значенню. Однак швидкість регулювання цих регуляторів порівняно невисока. До того ж, їх не можна використовувати на об'єктах без самовирівнювання (така система регулювання буде нестійкою).

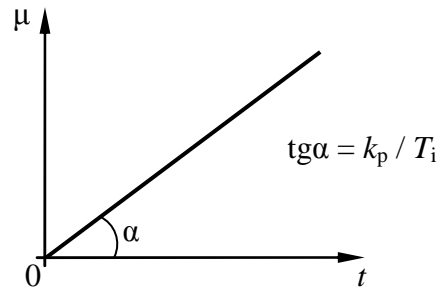


Рис. 1.36. Перехідна характеристика I-регулятора

Порівняння властивостей П- та I-регуляторів показує, що перший з них має кращі динамічні властивості й забезпечує перехідний процес регулювання з більшою швидкістю, а перевага другого, навпаки, полягає у кращих статичних характеристиках, оскільки він забезпечує зведення статичної похибки до нуля. Об'єднання їх у один регулятор може забезпечити поєднання в останньому наведених переваг кожного.

III-закон реалізує пропорційно-інтегральний або III-регулятор (його ще називають *ізодромним*<sup>5</sup>):

$$\mu = k_p \left( \varepsilon + \frac{1}{T_{i3}} \int_0^t \varepsilon dt \right); \quad (1.38)$$

$$W_{III\text{-рег}}(p) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_{i3}p} \right),$$

де  $T_{i3}$  – час ізодрому (подвоєння регульовального впливу до  $\mu = 2k_p$ ).

Перехідна функція III-регулятора має вигляд, як на рис. 1.37.

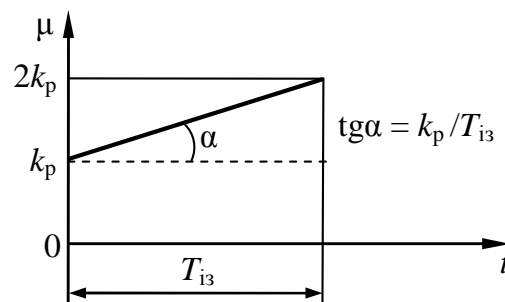


Рис. 1.37. Перехідна характеристика III-регулятора

<sup>5</sup> Від грец. ἴσος – «однаковий» і δρομος – «біг», тобто рівнобіжний (прим. авт.).

ПД-закон реалізує пропорційно-диференціальний або ПД-регулятор:

$$\mu = k_p \left( \varepsilon + T_d \frac{d\varepsilon}{dt} \right); \quad (1.39)$$

$$W_{\text{ПД-рег}}(p) = k_p (1 + T_d p),$$

де  $T_d$  – час диференціювання або час випередження (параметр налагодження регулятора). Він характеризує міру впливу за похідною на зміну вхідного параметра регулятора.

Перехідну функцію ПД-регулятора наведено на рис. 1.38 (слід зазначити, що такий перехідний процес – реакція регулятора на вхідний сигнал де-що іншої форми: не ступінчастий, а зі скошеним переднім фронтом).

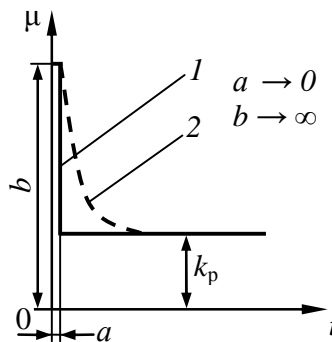


Рис. 1.38. Перехідні характеристики ПД-регуляторів: 1 – ідеального; 2 – реального

Спершу регульовальний вплив  $\mu$  змінюється стрибком під дією диференціальної складової, яка реагує не на абсолютне значення регульованої величини, а на швидкість її зміни, а потім – під дією пропорційної складової – набуває постійного значення  $\mu = k_p$ . Пропорційно-диференціальний регулятор використовується рідко, оскільки введення диференціальної складової в алгоритми регуляторів не позбавляє повністю від властивих П-регуляторам вад, хоча й здатне поліпшити керування об'єктом. А самостійно Д-регулятор (тобто регулювання лише за швидкістю змінювання регульованого параметра) взагалі не використовується, позаяк він зовсім не реагує на значення відхилення вхідних величин, хоч би якими значними вони не були (за постійного значення регульованої величини вихідний сигнал регулятора дорівнює нулю).

**ПІД-закон.** Регулятор, що реалізує цей алгоритм, називають пропорційно-інтегрально-диференціальним або ПІД-регулятором (його ще називають ізодромним регулятором з випередженням):

$$\mu = k_p \left( \varepsilon + \frac{1}{T_{i3}} \int_0^t \varepsilon dt + T_d \frac{d\varepsilon}{dt} \right); \quad (1.40)$$

$$W(p) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_{i3} p} + T_d p \right).$$

Графік перехідної функції реального ПІД-регулятора наведено на рис. 1.39 (пунктирна лінія відповідає ідеальному регуляторові). З графіка видно, що в інтервалі  $t_0-t_1$  переважає дія диференціальної та пропорційної складових регулятора, а з моменту часу  $t_1$  – пропорційної та інтегральної.

Як видно з назв законів і відповідних формул, П-складова реагує на відхилення  $\varepsilon$  негайно – регулювальний вплив  $\mu$  пропорційний поточному значенню  $\varepsilon$ , І-складова інтегрує похибку регулювання, намагаючись будь-що звести (і зводячи) її до нуля, Д-складова діє з випередженням на основі власного «прогнозу» (похідної). У кожного підходу свої позитивні та негативні сторони, і кожна складова – зі своїми особливостями.

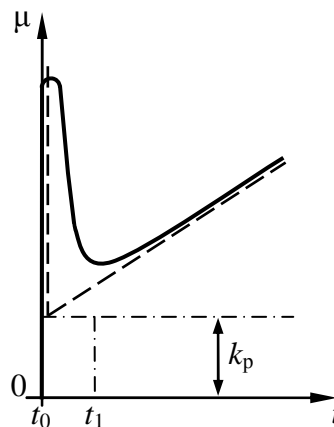


Рис. 1.39. Перехідна характеристика ПІД-регулятора

У ПІД-регуляторі можливості кожної складової об'єднуються, але для досягнення бажаного ефекту потрібно правильно використати їх переваги (за одночасної мінімізації притаманних вад). Для цього використовують різні методи визначення оптимальних значень параметрів налагодження регуляторів [9, 10, 24].

Якісно-порівняльний вигляд перехідних процесів у каналах збурення – вихід систем керування з різними алгоритмами регулювання наведено на рис. 1.40 [18].

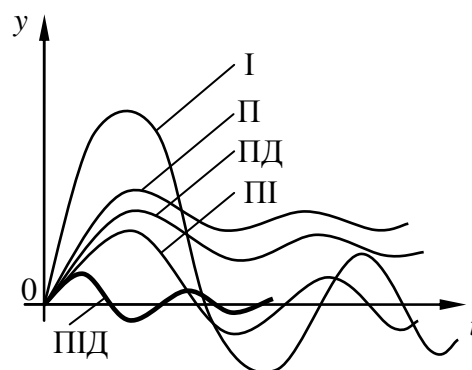


Рис. 1.40. Перехідні процеси у системах керування з різними законами регулювання

Наведені варіанти – це **лінійні закони** регулювання, що реалізуються *аналоговими* регуляторами. Нелінійних можна запропонувати безліч. Для прикладу розглянемо позиційне регулювання.

**Позиційні регулятори.** У разі автоматизації технологічних процесів для підтримання параметрів об'єкта керування на заданому рівні доволі широко використовують позиційні регулятори. Вони формують сигнал, який забезпечує переміщення регульовального органу в одне з фіксованих положень (позицій). Таких положень може бути два, три чи більше – саме за кількістю положень регульовального органу ці регулятори поділяються на дво-, три- та багатопозиційні. Позиційні регулятори здійснюють ступінчасті керувальні впливи на ОК: «увімкнено – вимкнено», «відкрито – закрито».

Найбільш поширені двопозиційні регулятори, у яких регульовальний орган може займати одне з двох граничних положень (рис. 1.41, *a*).

Алгоритм (закон) формування регульовального впливу цього регулятора:

$$\mu = -b, \text{ якщо } \varepsilon < 0;$$

$$\mu = b, \text{ якщо } \varepsilon > 0,$$

де  $\mu$  – регульовальний вплив (вихідний сигнал регулятора);  $\varepsilon$  – вхідний сигнал регулятора (величина відхилення).

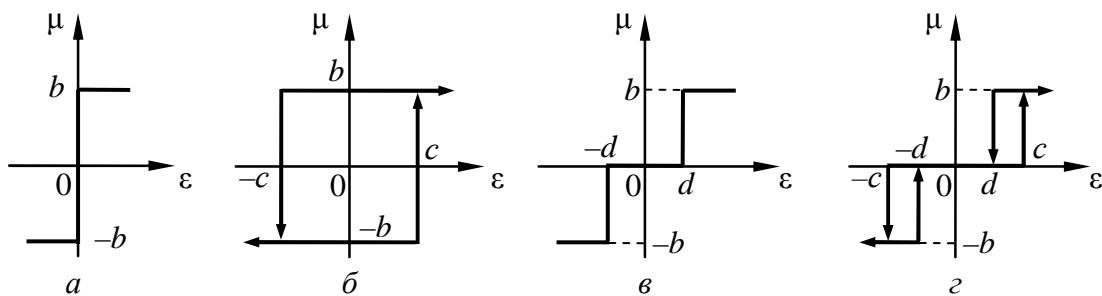


Рис. 1.41. Статичні характеристики позиційних регуляторів:

*a* – ідеального двопозиційного; *б* – двопозиційного із зоною неоднозначності  $2c$ ;

*в* – трипозиційного із зоною нечутливості  $2d$ ; *г* – трипозиційного із зонами неоднозначності  $2c$  і нечутливості  $2d$

Незалежно від величини відхилення такий регулятор завжди здійснює максимально можливий регульовальний вплив, тому керований об'єкт функціонує в коливальному режимі. Через це двопозиційні регулятори використовують тільки тоді, коли відхилення регульованої величини допустимі.

Характеристики двопозиційного регулятора можуть бути змінені введенням зони неоднозначності  $2c$ , в межах якої зміна регульованої величини не викликає переміщення регульовального органу (рис. 1.41, *б*). Алгоритм формування регульовального впливу такого регулятора має вигляд

$$\mu = \begin{cases} b, & \text{якщо } \varepsilon > c; \\ b \text{ або } -b, & \text{якщо } |\varepsilon| < c; \\ -b, & \text{якщо } \varepsilon < -c. \end{cases}$$

Це спричинить перемену характеру змінюваності керованого параметра (власне, характеру реагування ОК на впливи регулятора): амплітуда коливань збільшиться, а частота – зменшиться. Змінюючи розмір зони неоднозначності, можна досягти бажаного режиму функціонування ОК.

Динамічну характеристику керованого таким регулятором теплового об'єкта показано на рис. 1.42. З урахуванням введених позначень алгоритм роботи регулятора можна записати у вигляді

$$\mu = \begin{cases} \mu_{\max}, & \text{якщо } T < T_{\min}; \\ \mu_{\max} \text{ або } \mu_{\min}, & \text{якщо } T_{\min} \leq T \leq T_{\max}; \\ \mu_{\min}, & \text{якщо } T > T_{\max}. \end{cases}$$

Якщо відхилення поточного значення регульованого параметра  $T$  (температура об'єкта) від заданого  $T_{зд}$  перевищує значення  $T_{\max} = T_{зд} + c$ , яке відповідає верхній границі налагодження регулятора, то регулювальний орган перемикається в положення, що відповідає мінімальному регулювальному впливу на об'єкт  $\mu_{\min}$ .

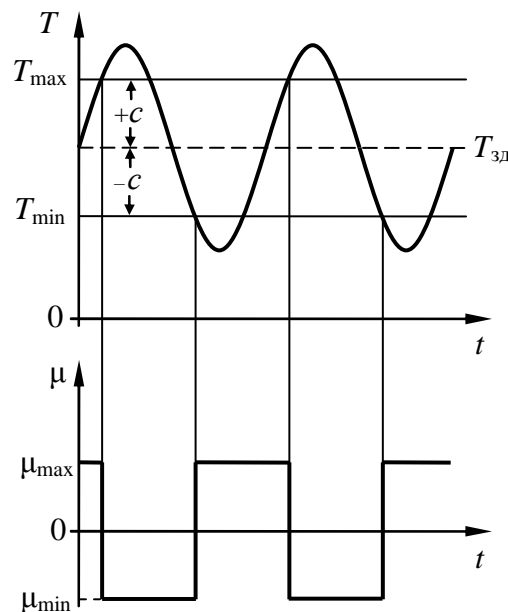


Рис. 1.42. Динамічна характеристика керованого теплового об'єкта з циклограмою формування регулювального впливу на об'єкт

Унаслідок переважальної дії збурення (більш низької температури довкілля), відхилення значення регульованого параметра  $T$  від заданого  $T_{зд}$  почне зменшуватися (об'єкт буде охолоджуватись). Але регулювальний орган залишиться в тому самому положенні, доки відхилення регульованого параметра не досягне нижньої границі зони неоднозначності  $T_{\min} = T_{зд} - c$ . Тільки тоді регулятор переведе регулювальний орган у положення, що відповідає максимальному регулювальному впливові на об'єкт  $\mu_{\max}$ , і регулю-



вальный вплив на об'єкт (подавання теплової енергії) збільшиться до максимального. Регулятор налагоджують так, щоб з перемиканням регулювального органу в положення  $\mu_{\max}$  регулювальний вплив явно перевищував дію збурення. Унаслідок цього значення регульованого параметра знову почне зростати. Таким чином, у системах керування з двопозиційним регулятором регульований параметр здійснює незгасальні коливання.

Двопозиційне регулювання переважно здійснюється електричними регуляторами, вбудованими у вторинні прилади: автоматичні мости, потенціометри, мілівольтметри.

У трипозиційних регуляторів, окрім двох крайніх (рис. 1.41, в, г), регулювальний орган може бути встановлено ще в одному (середньому) положенні, що забезпечує більш плавну зміну керованої величини та зменшує частоту спрацьовувань регулювального органу. Ще більш плавне регулювання можуть забезпечити багатопозиційні регулятори, здатні фіксувати регулювальний орган у декількох проміжних положеннях. У такий спосіб амплітуда коливань може бути знижена до певного мінімального значення, але зовсім усунути коливання в системах керування з позиційними регуляторами неможливо.

**Регулятори прямої дії.** Деяко окремо стоять перші з регуляторів – регулятори прямої дії (РПД). Ми вже розглянули деякі РПД, які для переміщення регулювального органу використовують енергію, взятую в самого об'єкта керування (РПД І. І. Ползунова та Дж. Уатта – див. п. 1.3.2 Кн. 1). Застосовують і сучасні промислові РПД (рис. 1.43).

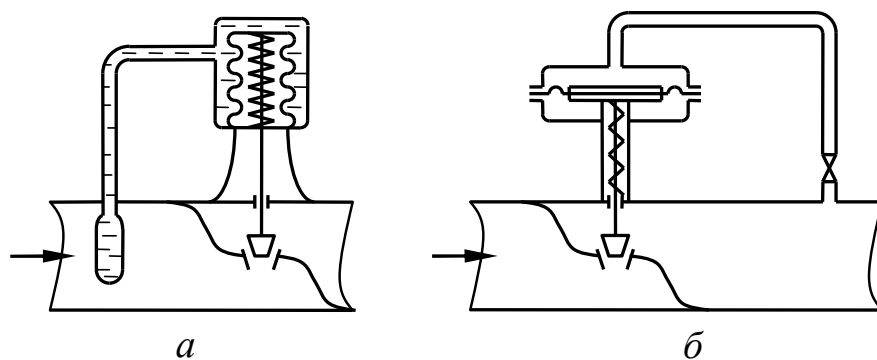


Рис. 1.43. Схеми РПД: *а* – температури; *б* – тиску

Регулятори прямої дії мають просту конструкцію, дешеві та прості в обслуговуванні, надійні в роботі. Водночас вони мають знижену чутливість, невисоку точність, а для переміщення регулювального органу потребують наявності значної потужності в об'єкті керування. Зазвичай РПД реалізують пропорційний або інтегральний закони регулювання і використовуються для регулювання рівня, температури та тиску, тобто параметрів, зі зміною яких чутливі елементи РПД можуть розвивати потрібну для зміщення регулювального органу потужність.

**Цифрові регулятори.** Розвиток засобів обчислювальної техніки, особливо мікропроцесорів і мікро-ЕОМ, став основою значного поширення цифрових систем автоматичного керування. Цифрові регулятори можуть реалізовувати і більш складні, ніж пропорціональні, інтегральні чи диференціальні алгоритми (або їх поєднання), що ґрунтуються на сучасних методах теорії дискретних систем, які використовують різні математичні моделі об'єктів керування. Цифрові регулятори можуть не тільки замінювати декілька аналогових регуляторів, а й виконувати додаткові функції – як виконували раніше іншими пристроями, так і зовсім нові – зокрема, ідентифікацію об'єкта керування, реалізацію адаптивних законів керування, підстроювання параметрів, перевірку номінальних режимів і перемикання режимів роботи системи, контроль значень сигналів, порівняння сигналів, резервування, діагностику та пошук несправностей.

Динамічні властивості дискретних регуляторів описують дискретними передавальними функціями або різницевиими рівняннями. У загальному випадку дискретну передавальну функцію дискретного регулятора можна подати у вигляді [13]

$$D(z) = \frac{u(z)}{e(z)} = \frac{\sum_{j=0}^k b_j z^{-j}}{\sum_{i=1}^s a_i z^{-i} + 1}, \quad (1.41)$$

де  $u(z)$  і  $e(z)$  – зображення керувального впливу та похибки системи, отримані за допомогою  $z$ -перетворення (див. п. 4.4.2).

Дискретній передавальній функції (1.41) відповідає різницеве рівняння

$$u[n] = b_0 e[n] + b_1 e[n-1] + \dots + b_k e[n-k] - (a_1 e[n-1] + a_2 e[n-2] + \dots + a_s e[n-s]),$$

де  $e[n]$  і  $u[n]$  – значення вхідних і вихідних сигналів у моменти часу  $t = nT$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$ .

Якщо у рівнянні (1.41)  $a_i = 0$  і  $b_j = 0$ , де  $i = 0, 1, \dots, k$ , а  $j = 1, \dots, s$ , отримаємо дискретну передавальну функцію П-регулятора:

$$D(z) = \frac{u(z)}{e(z)} = b_0. \quad (1.42)$$

Різницеве рівняння, що відповідає передавальній функції (1.42), має вигляд

$$u[n] = b_0 e[n].$$

Значення  $b_0 = 1$  відповідає коефіцієнту  $k = 1$ . Якщо  $b_0 > 1$ , то сигнал керування підсилюється, якщо  $b_0 < 1$  – послаблюється.

Опис регуляторів і моделей об'єктів керування в дискретному часі дає змогу істотно спростити синтез регуляторів і їх технічну реалізацію. На основі

цифрових регуляторів можуть бути побудовані системи автоматичного керування будь-яких типів, а програмне забезпечення систем можна коригувати як під час проектування, так і в процесі експлуатації.

## 1.6. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

Під час розроблення та проектування систем керування їх моделюють структурними або функціональними схемами, а для дослідження стійкості та перехідних процесів – математичними виразами, алгоритмами, програмами, що відображають кількісні залежності між вхідними та вихідними змінними.

Під *моделлю* розуміють уявну або фізичну конструкцію, властивості якої у певному розумінні відповідають виділеним властивостям модельованого об'єкта. Тож у межах цих властивостей модель може представляти або замінювати відповідний об'єкт, давати досить точну та достовірну інформацію про нього, а також давати змогу прогнозувати його поведінку та реакцію на певні збурення.

### 1.6.1. Математичне моделювання технологічних процесів

Математичні моделі широко застосовують у системах автоматизованого проектування (САПР) технологічних процесів, в автоматизованих системах керування технологічними процесами (АСК ТП) та автоматизованих системах наукових досліджень (АСНД).

Залежно від призначення до математичних моделей висувають різні вимоги. Якщо, скажімо, для математичних моделей, призначених для САПР, їх складність та час обчислення на ЕОМ мають другорядне значення, то для математичних моделей, призначених для керування, вимога до простоти – одна з визначальних, оскільки вони мають забезпечити розв'язання задач керування в реальному масштабі часу, тобто відповідати темпу проведення керованого процесу. Якщо модель об'єкта керування не забезпечує випередження процесу в самому об'єкті, то її застосування в алгоритмі керування не має сенсу.

У процесі експлуатації об'єкти керування часто змінюють свої властивості. Оскільки ж математична модель, використовувана для виконання завдань керування об'єктом, має бути точною, то під час її розроблення передбачають можливість використання процедури адаптації моделі відповідно до змінюваності властивостей об'єкта керування. Отримані таким чином моделі називають *адаптивними*. В них періодично здійснюється підстроювання коефіцієнтів або структури відповідно до зміни властивостей ОК.

Усі математичні моделі поділяються на статичні та динамічні.

*Статичні моделі* відображають статичні, стаціонарні або усталені режими роботи об'єкта моделювання, в яких його вхідні та вихідні параметри не залежать від часу. Статичні моделі формалізують залежність виходу об'єкта від його входу в статичному режимі.



Для технологічних об'єктів під *допустимою областю зміни значень параметрів* зазвичай розуміють область регламентних (тобто визначених регламентом технологічного процесу) обмежень, якими обмежуються мінімальні та максимальні значення параметрів. У цьому разі останні вирази можна записати так:

$$x_{j_{\min}} \leq x_j \leq x_{j_{\max}} \quad (j = 1, \dots, m);$$

$$y_{i_{\min}} \leq y_i \leq y_{i_{\max}} \quad (i = 1, \dots, n).$$

Визначальні технологічні параметри об'єкта керування (тиск, рівень, температура, концентрація тощо) можна подати відповідними координатами простору станів технологічного процесу. У такому (часто – багатовимірному) просторі за останніми виразами можна виділити багатогранник (симплекс) допустимої області нормального технологічного процесу. За такого подання технологічного процесу алгоритм керування ним можна трактувати як забезпечення перебування його параметрів (координат) у межах області нормального технологічного процесу або пошук оптимуму за відповідним критерієм у межах цієї області.

Моделюючи технологічні об'єкти керування, слід враховувати обмеження, які накладаються на вхідні параметри  $x_j$ . Забезпечення обмежень на вихідні параметри  $y_i$  – завдання керування.

### 1.6.2. Математичне моделювання систем керування

Математичне моделювання систем керування виконують під час їх розроблення та дослідження, позаяк для створення математичних моделей системи керування (їх ще називають алгоритмами функціонування) слід знати склад системи, її структуру та математичні моделі окремих елементів. Найбільш зручно потрібні для моделювання системи керування дані задавати структурною схемою системи.

Розглянемо моделювання системи автоматичного керування, реалізованої на локальних засобах, структурну схему якої зображено на рис. 1.45.

Система керування складається з таких елементів (рис. 1.45, а):

- об'єкт керування з вихідною величиною  $y$  і входами  $x$  та  $\lambda$  (збурення);
- імпульсна лінія зв'язку між об'єктом керування ОК та датчиком Д зі входом  $u$  і виходом  $u^*$ ;
- вимірювач (датчик) із входом  $u^*$  і виходом  $u_B$ ;
- імпульсна лінія зв'язку між датчиком і регулятором із входом  $u_B$  та виходом  $u_B^*$ ;
- регулятор із входами  $u_B^*$  й  $u_{зд}$  (завдання) та виходом  $\mu$ ;
- командна лінія зв'язку між регулятором і виконавчим механізмом ВМ із входом  $\mu$  і виходом  $\mu^*$ ;
- виконавчий механізм (ВМ) і регулювальний орган (РО) з входом  $\mu^*$  і вихідною величиною  $x$ .

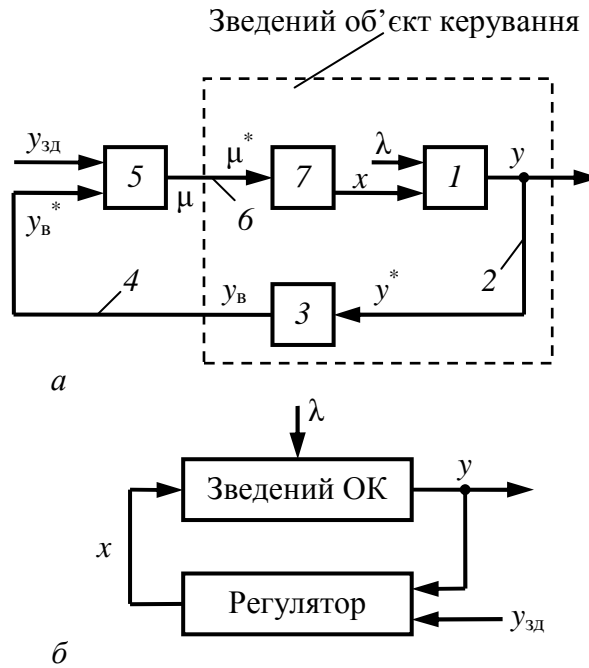


Рис. 1.45. Структурні схеми систем керування: а – розгорненої; б – спрощеної; 1 – об'єкт керування; 2, 4, 6 – лінії зв'язку; 3 – вимірювач (датчик); 5 – регулятор; 7 – виконавчий механізм і регульовальний орган

Усі наведені елементи можуть суттєво впливати на роботу системи керування, через що мають бути введені до її моделі. Тому для отримання математичної моделі системи керування спочатку розглянемо математичне моделювання її складових.

Об'єкт керування має вихідною величиною регульований параметр  $y$  та два входи: керувальний вплив  $x$  та збурення  $\lambda$ . Динамічна модель ОК найбільш невизначена, позаяк вона може змінюватись у дуже широких межах залежно від конструкції (будови) об'єкта та процесу, що в ньому перебігає. У загальному вигляді динамічна модель такого ОК може бути подана рівнянням динаміки:

$$\begin{aligned}
 & a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = \\
 & = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + x(t) + \\
 & + c_s \frac{d^s \lambda(t)}{dt^s} + c_{n-1} \frac{d^{s-1} \lambda(t)}{dt^{s-1}} + \dots + c_1 \frac{d\lambda(t)}{dt} + \lambda(t).
 \end{aligned} \quad (1.43)$$

Застосувавши до диференціального рівняння (1.43) перетворення Лапласа, отримаємо алгебричне рівняння:

$$\begin{aligned}
 & [a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + 1] y(p) = \\
 & = [b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + 1] x(p) + [c_n p^s + c_{n-1} p^{s-1} + \dots + c_1 p + 1] \lambda(p).
 \end{aligned}$$

Чи окремо для каналів впливу:

– для каналу керування  $x \rightarrow y$ :

$$\begin{aligned} & [a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + 1] y(p) = \\ & = [b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + 1] x(p); \end{aligned} \quad (1.44)$$

– для каналу збурення  $\lambda \rightarrow y$ :

$$\begin{aligned} & [a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + 1] y(p) = \\ & = [c_s p^s + c_{s-1} p^{s-1} + \dots + c_1 p + 1] \lambda(p). \end{aligned} \quad (1.45)$$

Математичну модель динаміки ОК, описану рівняннями (1.44) та (1.45), можна подати у вигляді передавальних функцій:

$$W_{\text{ОК}_{x \rightarrow y}}(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + 1}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + 1}; \quad (1.46)$$

$$W_{\text{ОК}_{\lambda \rightarrow y}}(p) = \frac{c_s p^s + c_{s-1} p^{s-1} + \dots + c_1 p + 1}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + 1}, \quad (1.47)$$

перша з яких відображає вияв динамічних властивостей ОК для каналу керування, друга – для каналу збурення.

Часто для математичного описування нескладних ОК та інших елементів систем керування використовують елементарні динамічні ланки, математичні моделі динаміки яких було розглянуто (див. підрозд. 1.2).

*Вимірювачі (датчики)* істотно впливають на якість системи керування, та з погляду динаміки їх описують переважно рівнянням аперіодичної ланки першого порядку:

$$T_{\text{дат}} \frac{dy_{\text{в}}(t)}{dt} + y_{\text{в}}(t) = k_3 y^*(t) \quad (1.48)$$

або передавальною функцією

$$W_{\text{дат}}(p) = \frac{y_{\text{в}}(p)}{y^*(p)} = \frac{k_3}{T_{\text{дат}} p + 1}. \quad (1.49)$$

Попри те, що конструктивно вимірювачі можуть бути досить складними, а їх точні динамічні моделі – значно складнішими за рівняння (1.48) і (1.49), через те, що їх швидкодія зазвичай значно вища від швидкодії об'єкта, для розрахунку системи їх описують спрощеними моделями (1.48), (1.49), а досить часто – передавальною функцією

$$W_{\text{дат}}^*(p) = \frac{y_{\text{в}}(p)}{y^*(p)} = k_3. \quad (1.50)$$

З огляду на це спосіб подання моделі вимірювача залежить від співвідношення його швидкодії та швидкодії об'єкта керування. Якщо їх швидкодії порівнянні між собою, то беруть модель (1.48) чи (1.49) або ще скла-

днішу. Якщо ж швидкодія вимірювача на порядок чи більше вища за швидкодію об'єкта, то для розрахунків у системі беруть модель (1.50).

Модель *регулятора* – його закон (алгоритм) регулювання (1.36)...(1.40) (найчастіше використовують пропорційно-інтегральний або ПІ-закон).

У моделюванні *виконавчого механізму* та *регулювального органу* послуговуються тими самими міркуваннями, що й у разі моделювання вимірювача. Точна їх модель, як і конструкція, досить складна. Та позаяк їх вплив на загальну динаміку системи керування може бути незначним, то під час моделювання системи керування ВМ і РО подають аперіодичною ланкою першого порядку:

$$T_{\text{ВМ}} \frac{dx(t)}{dt} + x(t) = k_4 \mu^*(t);$$

$$W_{\text{ВМ}}(p) = \frac{x(p)}{\mu^*(p)} = \frac{k_4}{T_{\text{ВМ}} p + 1}.$$

Коли швидкодія ВМ з РО значно вища (на порядок і більше) за об'єкт керування, їх модель, як і модель датчика, подають безінерційною ланкою:

$$W_{\text{ВМ}}(p) = x(p) / \mu^*(p) = k_4.$$

Окрім розглянутих елементів система керування охоплює ще й *лінії зв'язку*. Інформація, що передається лініями зв'язку, надходить із деяким запізненням відносно часу відправлення. Особливо це стосується пневматичних ліній зв'язку, в яких сигнали передають зі швидкістю близько 300 м/с, та ліній зв'язку аналізаторів із пристроями відбору проб для аналізу. Виходячи з цього, динамічні елементи 2, 4, 6 системи керування, схему якої наведено на рис. 1.45, можуть бути описані такими рівняннями динаміки:

$$y^*(t) = y(t - \tau_2); \quad (1.51)$$

$$y_{\text{В}}^*(t) = y(t - \tau_4); \quad (1.52)$$

$$\mu^*(t) = \mu(t - \tau_6), \quad (1.53)$$

де  $y^*(t)$ ,  $y_{\text{В}}^*(t)$ ,  $\mu^*(t)$  – вихідна інформація відповідних ліній зв'язку;  $\tau_2$ ,  $\tau_4$ ,  $\tau_6$  – час транспортного запізнення відповідних ліній зв'язку.

Відповідно до рівнянь (1.51)...(1.53), запишемо передавальні функції ліній зв'язку:

$$W_2(p) = \frac{y^*(p)}{y(p)} = e^{-p\tau_2};$$

$$W_4(p) = \frac{y_{\text{В}}^*(p)}{y_{\text{В}}(p)} = e^{-p\tau_4};$$

$$W_6(p) = \frac{\mu^*(p)}{\mu(p)} = e^{-p\tau_6}.$$



Для електричних ліній зв'язку, а також у разі, коли швидкодія лінії зв'язку значно вища за швидкодію ОК, передавальні функції ліній зв'язку беруть за одиницю, тобто їх динамікою нехтують, прирівнюючи виходи попередніх елементів до входів наступних.

Далі перейдемо до *моделювання системи керування*. Якби система керування була розімкненою, то, враховуючи послідовне з'єднання її елементів, передавальна функція розімкненої системи мала б вигляд (див. підрозд. 1.2)

$$W_{p.c}(p) = W_{OK}(p)W_2(p)W_{дат}(p)W_4(p)W_p(p)W_6(p)W_{BM}(p).$$

Для замкненої системи із від'ємним зворотним зв'язком згідно з (1.3) передавальна функція для каналу керування («завдання – вихід») матиме вигляд:

$$W_{z.c}(p)_{y_{зд} \rightarrow y} = \frac{W_{пк}(p)}{1 + W_{p.c}(p)} = \frac{W_p(p)W_6(p)W_{BM}(p)W_{OK}(p)}{1 + W_{p.c}(p)}, \quad (1.54)$$

де  $W_{пк}(p)$  – передавальна функція прямого каналу системи керування.

Те саме для каналу «збурення – вихід»:

$$W_{z.c}(p)_{\lambda \rightarrow y} = \frac{W_{OK}(p)}{1 + W_{p.c}(p)}. \quad (1.55)$$

У цьому разі для виразів (1.54) та (1.55) за передавальну функцію ОК беруть  $W_{OK}(p)_{x \rightarrow y}$  і  $W_{OK}(p)_{\lambda \rightarrow y}$ , згідно з функціями (1.46) і (1.47) відповідно.

Як ми переконалися, під час моделювання системи керування всі її елементи, крім ОК, мають заздалегідь визначені моделі (їх структуру та основні параметри), а отримання моделі системи переважно залежить від наявності моделі об'єкта керування, тому під час розроблення моделей систем керування увагу приділяють переважно моделюванню саме об'єктів керування.

Та перш ніж перейти до розгляду об'єктів керування, розглянемо питання відповідності розробленої моделі об'єкту моделювання.

### 1.6.3. Адекватність моделей

Під адекватністю моделей розуміють їх відповідність об'єкту моделювання (в межах розв'язуваної задачі), тобто можливість застосовувати моделі замість об'єктів у певних задачах. Отримувані в процесі моделювання моделі можуть не відповідати об'єктам моделювання, що спричинює потребу у перевірці їх відповідності об'єктам моделювання<sup>6</sup>. Адекватність

<sup>6</sup> Насправді слід говорити про відповідність моделі розв'язуваній задачі, а не об'єкту зокрема. Модель створюється не взагалі для об'єкта моделювання як такого (на всі випадки життя), а відповідно до умов конкретної задачі, для розв'язання якої збираються цю модель застосувати. І саме залежно від потреб конкретної задачі динамічні властивості одного й того самого об'єкта можуть описуватися різними моделям: для одних задач його можна моделювати безінерційною ланкою, для других – аперіодичними ланками першого чи другого порядків, а для третіх доведеться додатково ввести ще й ланку транспортного запізнення. І кожна з них, зрозуміло, не може бути цілком адекватною (вони ж різні!) реальному об'єкту моделювання, тому ці різні моделі слід перевіряти на відповідність тим різним задачам, для яких вони створені.

математичних моделей визначають зіставленням результатів розрахунку реакції моделі з отриманою експериментально реакцією самого об'єкта моделювання у тих самих умовах і на те саме збурення.

Як уже зазначалося, математичні моделі в загальному випадку являють собою функціональні залежності: статичні – залежність вихідних параметрів об'єкта від вхідних, а динамічні – залежність вихідних параметрів об'єкта від часу в перехідних режимах під дією якогось збурення. Якщо отримана на об'єкті моделювання експериментальна статична характеристика досить точно відображає властивості об'єкта, то про адекватність моделі можна судити із зіставлення розрахункової 1 та експериментальної 2 характеристик (рис. 1.46).

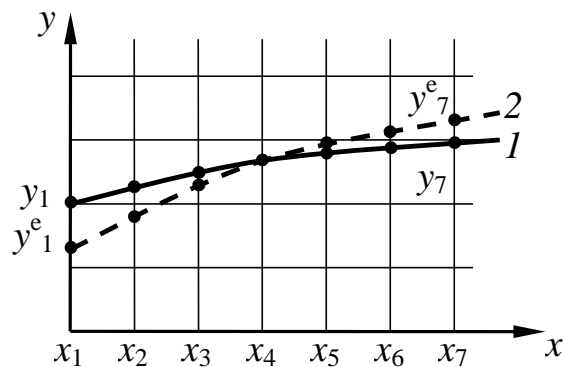


Рис. 1.46. Графіки статичних характеристик: 1 – моделі; 2 – об'єкта моделювання

Найчастіше для визначення похибки моделі або розбіжності функції користуються середньоквадратичним відхиленням  $\sigma$  (середньоквадратичною похибкою моделі):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^e)^2},$$

де  $y_i$  та  $y_i^e$  – дискретні значення вихідної величини об'єкта моделювання, отримані відповідно розрахунковим (з моделі) та експериментальним способами.

Зважаючи на те, що експериментально отримана характеристика теж має обмежену точність, під час дослідження адекватності моделі за експериментальними даними слід враховувати також похибки експериментальних характеристик.

## 1.7. АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОВЕДІНКИ ЗАМКНЕНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗАЛЕЖНО ВІД ЗБУРЕНЬ, ЩО ДІЮТЬ НА НЕЇ, ТА ХАРАКТЕРИСТИК РЕГУЛЯТОРА

Очевидно, що процеси в замкненій системі будуть якимось чином залежати від того, які збурення діють на систему (звідки, в якій послідовності, якого виду, в яких точках прикладені), а також від того, який регулятор (закон регулювання) використано та які параметри налагодження має цей регуля-

тор, тобто які значення мають  $k_p$ ,  $T_i$ ,  $T_{i3}$ ,  $T_d$ . Кількісно судити про це (як і про властивості системи керування в цілому) можна, розв'язуючи відповідну систему диференціальних рівнянь: рівняння об'єкта, скажімо (1.7), рівняння регулятора, наприклад (1.38), і рівняння для суматора типу  $\varepsilon = y_{зд} - y$  утворюють систему диференціальних рівнянь, яка моделює фізичну систему (тут – замкнену систему автоматичного керування). Якщо ж читач зауважить, що рівняння (1.38) не диференціальне, то нехай продиференціює його за часом, алгебричне ж рівняння для суматора формально можна розглядати як диференціальне нульового порядку.

Диференціальні рівняння та їх системи можна розв'язувати (інтегрувати) різними способами. Класичний метод – аналітичний – всебічно висвітлено в численних математичних посібниках. Є модифікації аналітичного методу, скажімо, операторний із використанням перетворення Лапласа, про яке вже йшлося. Є, зрештою, числові методи – розрахунки там елементарні, але їх дуже багато. До недавнього часу це було непереборною перешкодою для застосування цих методів. Але з розвитком комп'ютерів і відповідного програмного забезпечення це перестало бути проблемою (навіть більше – тепер досліджувати динаміку нетривіальної системи без комп'ютера – це вже анахронізм).

Нехай потрібно проінтегрувати диференціальне рівняння

$$\frac{dy}{dt} = f(y, t) \quad (1.56)$$

за початкової умови  $y|_{t=0} = y_0$ .

Переходимо від неперервного аргумента  $t$  до його дискретного аналога  $v$ , вважаючи, що

$$t = v\tau,$$

де  $v$  – номер кроку,  $\tau$  – величина кроку за часом  $t$ .

Тоді

$$y|_{t=v\tau} = y_v. \quad (1.57)$$

Замінімо похідну в лівій частині рівняння (1.57) різницеvim співвідношенням (через різницю вперед або, як її ще називають, першу праву різницю):

$$\frac{dy}{dt} \approx \frac{y_{v+1} - y_v}{\tau}.$$

Якщо  $\tau \rightarrow 0$  (а саме таке мале  $\tau$  й буде використовуватися), то співвідношення (1.57) відповідатиме визначенню похідної.

Тоді рівняння (1.56) набуває вигляду

$$\frac{y_{v+1} - y_v}{\tau} = f(y_v, t_v). \quad (1.58)$$

Тут  $t_v = v\tau$ .

Розв'язуємо рівняння (1.58) відносно  $y_{v+1}$ :

$$y_{v+1} = y_v + \tau f(y_v, t_v). \quad (1.59)$$

Формулу (1.59) можна розглядати як рекурентну. Маючи  $y_0$  (початкова умова) для  $v = 0$ , за формулою (1.59) обчислюють  $y_1$ :  $y_1 = y_0 + \tau f(y_0, 0)$ .

Маючи  $y_1$  та  $t_1 = \tau$ , обчислюють  $f(y_1, t_1)$ . Далі за рівнянням (1.59) для  $v = 1$  обчислюють  $y_2$ :  $y_2 = y_1 + \tau f(y_1, \tau)$  і т. д.

Таких кроків доведеться зробити, можливо, кілька сотень або тисяч, або десятків тисяч. Комп'ютер із цим легко впорається, якщо йому «пояснити» (запрограмувати), як зробити один крок і скільки разів повторити цю дію. І вже невдовзі буде виведено значення  $y_0, y_1, y_2, \dots, y_n$ . Ці значення  $y$  (їх називають *дискретами*) можна занести у масив, за ними можна сформувати графік  $y = \varphi(t)$ . Якщо вигляд графіка не задовольняє, можна спробувати його покращити: щось змінити в залежності  $f(y, t)$  і розв'язання повторити – аж до отримання потрібного результату (сучасний комп'ютер задачу типу (1.59) з тисячами кроків розв'язує за малі частки секунди, тож графік розв'язку з'являтиметься на екрані майже миттєво).

Викладений метод – це класичний метод Ейлера. Є чимало інших методів числового інтегрування звичайних диференціальних рівнянь та їх систем [12, 16], зокрема методи Рунге–Кутта, Рунге–Кутта–Мерсона, Адамса тощо – вибрати є з чого.

Для моделювання динаміки не лише об'єкта, а замкненої системи керування в цілому, паралельно з інтегруванням диференціального рівняння об'єкта керування потрібно інтегрувати й рівняння регулятора.

Тоді для П-регулятора з виразу (1.36) отримаємо

$$\mu_{v+1} = k_p \varepsilon_{v+1},$$

де  $\varepsilon_{v+1} = y_{здv+1} - y_{v+1}$ .

Для І-регулятора – з (1.37):

$$\mu_{v+1} = \mu_v + \frac{\tau}{T_i} \varepsilon_v.$$

Для ІІІ-регулятора – з (1.38):

$$\mu_{v+1} = k_p \left[ \varepsilon_v + \frac{1}{T_i} \left( \int_0^{t_v} \varepsilon dt + \int_{t_v}^{t_{v+1}} \varepsilon dt \right) \right]$$

або

$$\mu_{v+1} = k_p \left[ \varepsilon_v + \frac{1}{T_i} (I_v + \varepsilon_v \tau) \right].$$

Тут  $I_v$  – значення інтеграла, накопичене за час від  $v = 0$  до  $v$  поточного, а  $\varepsilon_v \tau$  наближено представляє  $\int_{t_v}^{t_{v+1}} \varepsilon dt$  за умови, що часова величина кроку  $\tau$  – мала (достатньо мала, щоб відхилення  $\varepsilon$  за цей час не встигло суттєво змінитися).

Для ПД-регулятора – з (1.39):

$$\mu_{v+1} = k_p \left( \varepsilon_v + T_d \frac{\varepsilon_{v+1} - \varepsilon_v}{\tau} \right).$$

І, зрештою, для ПД-регулятора з виразу (1.40) отримаємо

$$\mu_{v+1} = k_p \left[ \varepsilon_v + \frac{1}{T_{із}} (I_v + \varepsilon_v \tau) + T_d \frac{\varepsilon_{v+1} - \varepsilon_v}{\tau} \right].$$

## 1.8. СТІЙКІСТЬ ЛІНІЙНИХ СИСТЕМ

Стійкість – найважливіша вимога до будь-якої системи керування. Проблема стійкості зазвичай виникає в замкнених системах автоматичного керування через вплив зворотного зв'язку. Якщо система не здатна відновити стан рівноваги, порушений у процесі роботи, то вона непридатна до практичного використання. З огляду на це кожна система автоматичного керування має бути стійкою.

Розглянемо спочатку фізичний аспект поняття «стійкість». Припустимо, що лінійна система керування перебуває у стані рівноваги, але в якийсь момент часу на неї починає діяти збурення (будь-яке, але воно має бути скінченним, оскільки під дією нескінченного збурення жодна фізична система залишатись тим, чим вона була до збурення, не може – і тоді вже буде не до оцінювання її стійкості). Реагуючи на дію збурення, система приходить у рух (це не обов'язково механічний рух: в автоматичності рух – це зміна). Поки триває збурення – триває рух (зміна стану). В момент припинення дії збурення система керування, яка перебуває в певному «збудженому» стані, може поводитися по-різному (так званий вільний рух системи).

Можливі різні варіанти подальшої поведінки системи керування.

Наочне уявлення про стійкий і нестійкий стани рівноваги дає розгляд системи *кулька–поверхня*. Кулька, розміщена в глибокій западині (рис. 1.47, *а*), перебуває в стійкому стані рівноваги, тому що після відхилення під дією зовнішнього впливу вона повертається до свого початкового стану. Тож така система кулька–поверхня є стійкою. Кулька, розміщена на верхній точці випуклої поверхні (рис. 1.47, *б*), перебуває в нестійкому стані рівноваги: достатньо незначного відхилення від цього стану, й кулька скотиться схилом поверхні донизу і вже не повернеться до початкового положення. Така система – нестійка.

Можливо, що система приходить до стану рівноваги, але цей стан відрізняється від попереднього – їй байдуже де зупинитись, як, наприклад, м'ячу на футбольному полі після удару футболіста. Таку систему називають нейтральною (рис. 1.47, в).

Отже, під *стійкістю* розуміють властивість системи повертатися до попереднього стану рівноваги після виведення її з цього стану і закінчення дії задавального впливу чи збурення. У загальному випадку система буде стійкою, якщо за будь-якого обмеженого вхідного сигналу вихідний сигнал також буде обмеженим у всі моменти часу.

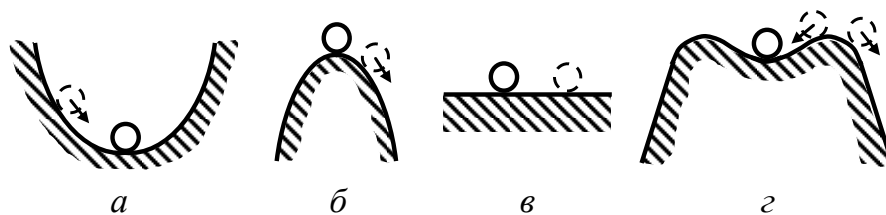


Рис. 1.47. До поняття стійкості рівноваги стану системи *кулька – поверхня*:  
*а* – стійкий стан; *б* – нестійкий стан; *в* – нейтральний стан;  
*г* – стан, стійкий за малих і нестійкий за великих відхилень

Тільки стійка система працездатна, тому однією з основних задач теорії автоматичного керування є дослідження стійкості систем автоматичного керування. Основи строгої теорії стійкості динамічних систем було розроблено акад. О. М. Ляпуновим у роботі «Загальна задача про стійкість руху» (1892). Поняття стійкості, виходячи з цієї роботи, полягає ось у чому: якщо динамічні властивості системи описуються лінійним диференціальним рівнянням, то її стійкість не залежить від величини збурення; лінійна система, стійка за малих збурень, буде стійкою і за великих; нелінійні ж системи можуть бути стійкими за малих збурень і нестійкими за великих.

Прикладом такої нелінійної системи є маятникові годинники. Якщо нерухомий маятник штовхнути слабко, то він, зробивши декілька коливань, зупиниться, тобто за малих збурень система стійка. Якщо ж маятник штовхнути сильніше, то у заведеному годиннику він починає робити незгасальні коливання. Отже, за великих збурень така система нестійка.

Наочне уявлення про нелінійні системи, стійкі за малих і нестійкі за великих збурень, дає розглядання кульки, розміщеної у западині, утвореній на вершині випуклого тіла (рис. 1.47, г). За малих відхилень, які не виходять за краї западини, кулька повертається до початкового (незбуреного) положення, тобто за таких умов система *кулька – поверхня* стійка. У разі відхилення за краї западини кулька вже не повертається до початкового положення – система нестійка. З огляду на це стійкість нелінійних систем

досліджується окремо для випадку малих збурень, тобто стійкість у малому, і стійкість за великих збурень, тобто стійкість у великому.

Згідно з теоремою Ляпунова стійкість нелінійних систем у разі малих збурень можна визначити за їх лінеаризованими рівняннями, які достатньо точно описують поведінку систем, спричинену малими відхиленнями від стану рівноваги. Для визначення стійкості нелінійних систем за великих збурень слід користуватися початковими нелінійними рівняннями динаміки. У більшості практичних випадків системи, стійкі за малих відхилень, можуть бути стійкими і за достатньо великих відхилень, можливих у процесі експлуатації, тому питання про стійкість цих систем вирішується на основі дослідження лінеаризованих рівнянь.

Коротко розглянемо математичний аспект стійкості. Стійкість систем визначається її характеристичним рівнянням або, що те саме, її характеристичним поліномом (обмежимося аналізом систем, у яких ліва частина характеристичного рівняння – поліном). Характеристичний поліном (як будь-який поліном) має корені. Відповідно до «золотої теореми алгебри», поліном  $n$ -го степеня має рівно  $n$  коренів. Корені полінома можна зображувати у вигляді точок на комплексній площині, адже серед них можуть виявитись і комплексні.

Кореневі критерії стійкості пов'язують поняття стійкості з характером розміщення коренів характеристичного полінома на комплексній площині (рис. 1.48). Якщо вся сукупність коренів розміщується ліворуч від уявної осі (рис. 1.50, *a*), то система буде гарантовано стійкою. Подібну систему ще називають *асимптотично стійкою* – такою вона є тоді і тільки тоді, коли виконується умова

$$\operatorname{Re} p_i < 0, i = 1, 2, \dots, n.$$

Коли якийсь дійсний корінь або пара комплексно-спряжених коренів (комплексні корені обов'язково «ходять» парами), чи будь-яка інша кількість коренів «усідаються» на уявну вісь, а праворуч від цієї осі немає жодного кореня (рис. 1.50, *б*), то така система перебуває на межі стійкості – її ще називають *нейтрально стійкою*, тобто уявна вісь і є межею стійкості.

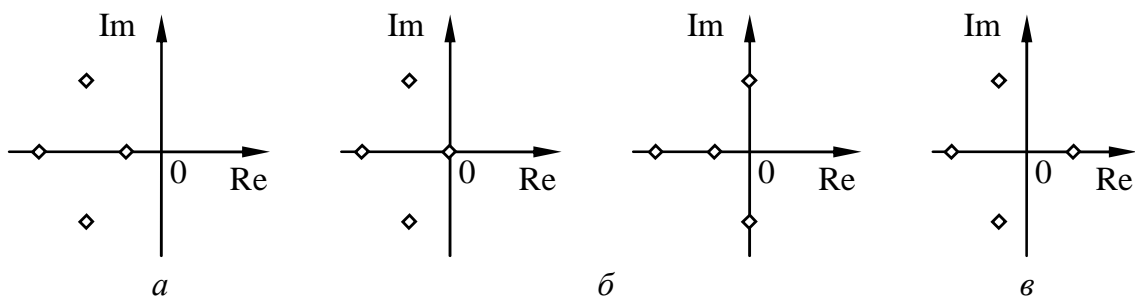


Рис. 1.48. Розміщення коренів характеристичного полінома систем керування:  
*a* – стійкої; *б* – нейтрально стійкої; *в* – нестійкої

Отже, система нейтрально стійка (стійка за Ляпуновим), якщо задовольняється одна з умов:

$$a) \begin{cases} \operatorname{Re} p_i < 0, i = 1, 2, \dots, n-1; \\ p_n = 0 \end{cases}$$

(аперіодична межа стійкості) або

$$б) \begin{cases} \operatorname{Re} p_i < 0, i = 1, 2, \dots, n-2; \\ \operatorname{Re} p_{n-1, n} = 0, \operatorname{Im} p_{n-1, n} \neq 0 \end{cases}$$

(коливальна межа стійкості).

*Аперіодична межа* стійкості, що відповідає розміщенню одного дійсного кореня на уявній осі, зумовлює виникнення в системі незгасального аперіодичного процесу, а *коливальна межа*, що відповідає парі суто уявних коренів, – незгасального коливального процесу.

Якщо принаймні один із коренів виявляється поза межею стійкості, тобто у правій півплощині (рис. 1.48, в), – це незаперечна ознака втрати системою стійкості. Виходить, усе просто – досить визначити корені характеристичного полінома (чи, відповідно, рівняння) і перевірити знаки їх дійсних частин: усі від’ємні – система стійка, принаймні один корінь має перед дійсною частиною знак плюс – система нестійка. Трохи складніше із визначенням коренів поліномів  $n$ -го степеня, ще складніше з комплексними коренями. Утім, сучасний комп’ютер з відповідним програмним забезпеченням знаходить повний комплект коренів полінома практично будь-якого степеня майже миттєво і навіть визначить: стійка – нестійка.

А що робити, якщо все ж нестійка? Можна спробувати щось поміняти у системі, знову підрахувати характеристичні поліноми і – до комп’ютера. І так перебирати варіанти, аж поки не натрапите на задовільний (утім, його може й не бути, адже не виключено, що такого розв’язку взагалі не існує).

Пролити світло на цю проблему можуть так звані критерії стійкості [5, 10, 12, 14, 17]. Сформулюємо їх без доведення.

**Критерій Гурвиця.** Нехай характеристичне рівняння має вигляд

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0 = 0. \quad (1.60)$$

Перше, що треба перевірити, чи  $a_n$  не нуль. Якщо  $a_n \neq 0$ , – система стійка. Якщо ж  $a_n = 0$ , слід відкинути доданок  $a_n p^n$  і перевірити  $a_{n-1}$ . Якщо і воно нуль, то і його слід відкинути – і так, аж поки старший коефіцієнт (при старшому з невідкинутих членів степеня  $p$ ) не буде нулем. Далі потрібно перевірити перший ненульовий старший коефіцієнт (із тим  $n$ , до якого дійшли в процесі відкидання членів характеристичного рівняння з нульовими коефіцієнтами), чи  $a_n > 0$ . Якщо так – добре, якщо ні, то потрібно змінити в рівнянні (1.60) знаки усіх коефіцієнтів на протилежні (корені рівняння – а саме вони визначають стійкість досліджуваної системи – від цього не



зміняться). Отже, тепер і  $a_n > 0$  – можна вдатися до формування визначника Гурвиця  $\Delta$ . Для конкретності алгоритм його формування розглянемо на прикладі  $n = 6$ , а потім узагальнимо на довільне значення  $n$ .

Отже, визначник Гурвиця

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_5 & a_3 & a_1 & 0 & 0 & 0 \\ a_6 & a_4 & a_2 & a_0 & 0 & 0 \\ 0 & a_5 & a_3 & a_1 & 0 & 0 \\ 0 & a_6 & a_4 & a_2 & a_0 & 0 \\ 0 & 0 & a_5 & a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & a_6 & a_4 & a_2 & a_0 \end{vmatrix}.$$

Алгоритм формування визначника Гурвиця можна сформулювати так. Уздовж головної діагоналі слід записати послідовно коефіцієнти, починаючи з  $a_{n-1}$  (у нашому випадку це  $a_5$ ). Вниз від кожного діагонального коефіцієнта послідовно виписати коефіцієнти, які в характеристичному рівнянні розміщено ліворуч від відповідного діагонального, а вверху – ті, що праворуч від нього. Якщо коефіцієнти закінчились – записувати нулі.

Критерій Гурвиця (він належить до алгебричних критеріїв стійкості) дає змогу відповісти на запитання: є серед коренів цього характеристичного рівняння (полінома) розміщені в правій півплощині, чи немає. Якщо є, то система нестійка, в іншому разі – стійка. А сам критерій має таке визначення: *для того, щоб система була стійкою, необхідно і достатньо, щоб за  $a_n > 0$  всі діагональні мінори визначника Гурвиця були строго додатними.*

Стосовно сформованого визначника це виглядає так:

$$a_6 > 0;$$

$$\Delta_1 = a_5 > 0;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_5 & a_3 \\ a_6 & a_4 \end{vmatrix} > 0;$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_5 & a_3 & a_1 \\ a_6 & a_4 & a_2 \\ 0 & a_5 & a_3 \end{vmatrix} > 0;$$

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} a_5 & a_3 & a_1 & 0 \\ a_6 & a_4 & a_2 & a_0 \\ 0 & a_5 & a_3 & a_1 \\ 0 & a_6 & a_4 & a_2 \end{vmatrix} > 0;$$

$$\Delta_5 = \begin{vmatrix} a_5 & a_3 & a_1 & 0 & 0 \\ a_6 & a_4 & a_2 & a_0 & 0 \\ 0 & a_5 & a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & a_6 & a_4 & a_2 & a_0 \\ 0 & 0 & a_5 & a_3 & a_1 \end{vmatrix} > 0;$$

$$\Delta_6 = \Delta = \Delta_5 a_0 > 0.$$

Як обчислювати значення визначників (діагональні мінори – теж визначники) – відомо [10, 12, 14, 17]. Це простіше, ніж обчислювати корені полінома  $n$ -го степеня, і що суттєво (принаймні, для систем із відносно невисоким порядком), тут проглядається можливість аналізу впливу параметрів систем (зашифрованих у коефіцієнтах характеристичного полінома) на стійкість.

Проілюструємо використання критерію Гурвиця на прикладах. Почнемо з системи першого порядку ( $n = 1$ ). Її характеристичне рівняння

$$a_1 p + a_0 = 0 \quad (1.61)$$

і визначник Гурвиця

$$\Delta = \|a_0\|.$$

Відповідно, критерій Гурвиця

$$\begin{cases} a_1 > 0; \\ a_0 > 0. \end{cases} \quad (1.62)$$

Справді, характеристичне рівняння (1.61) має усього один корінь:

$$p_1 = -a_0 / a_1.$$

І він буде від'ємним, якщо  $a_0$  і  $a_1$  матимуть однакові знаки. Оскільки ж ми домовилися (для зручності), що  $a_n > 0$ , то й  $a_0 > 0$ .

Перейдемо до системи другого порядку ( $n = 2$ ).

Її характеристичне рівняння

$$a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0, \quad (1.63)$$

визначник Гурвиця

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_1 & 0 \\ a_2 & a_0 \end{vmatrix},$$

критерій (умови) Гурвиця

$$\begin{cases} a_2 > 0; \\ a_1 > 0; \\ a_1 a_0 - a_2 \cdot 0 = a_1 a_0 > 0. \end{cases} \quad (1.64)$$

Якщо  $a_1 > 0$ , то з останньої умови ( $a_1 a_0 > 0$ ) випливає, що й  $a_0 > 0$ . Отже,  $a_2 > 0$ ,  $a_1 > 0$ ,  $a_0 > 0$ . Можливо, це справедливо для будь-якого  $n$ ? Давай-те перевіримо для  $n = 3$ .

Маємо, відповідно,

$$a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0, \quad (1.65)$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_2 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & a_2 & a_0 \end{vmatrix}.$$

Тоді критерій Гурвиця

$$\begin{cases} a_3 > 0; \\ \Delta_1 = a_2 > 0; \\ \Delta_2 = a_2 a_1 - a_3 a_0 > 0; \\ \Delta_3 = \Delta_2 a_0 > 0. \end{cases} \quad (1.66)$$

З четвертої умови (якщо виконується третя) випливає, що  $a_0 > 0$ . Тоді з третьої легко бачити, що  $a_1 > 0$ . Отже, як і в попередньому випадку (для  $n = 2$ ),  $a_3 > 0$ ,  $a_2 > 0$ ,  $a_1 > 0$ ,  $a_0 > 0$ .

Тож, як і належить, усі коефіцієнти характеристичного рівняння мають бути строго додатні. Але, як видно з третьої умови, цього може виявитись недостатньо. Потрібно, щоб

$$a_2 a_1 - a_3 a_0 > 0 \quad (1.67)$$

(можна мати додатними усі коефіцієнти характеристичного рівняння і все одно не задовольняти цієї умови).

Отже, обов'язкова умова стійкості системи будь-якого порядку – строга додатність усіх коефіцієнтів її характеристичного рівняння (більш розширено – щоб усі коефіцієнти мали однакові знаки і серед них не було нульових). Як видно із розглянутих прикладів, для систем 1-го та 2-го порядків ( $n = 1, 2$ ) необхідна умова водночас і достатня. Для систем більш високих порядків потрібно задовольнити ще низку додаткових умов.

Для систем до 3-го порядку умову (1.67) можна переписати так:

$$a_1 a_2 > a_0 a_3, \quad (1.68)$$

тобто добуток «середніх» коефіцієнтів має бути більшим за добуток «крайніх» (інакше кажучи, «ядро» має бути «важчим»).

А тепер спробуємо застосувати отримані результати для дослідження конкретних систем – трохи більш конкретних, ніж задані рівняннями (1.61), (1.63), (1.65). Нехай маємо систему, схему якої зображено на рис. 1.49 (легко бачити, що це лише конкретизація схеми, наведеної на рис. 1.17). Маємо

об'єкт керування у вигляді аперіодичної ланки першого порядку та П-регулятор (нульового порядку). Зворотний зв'язок від'ємний.

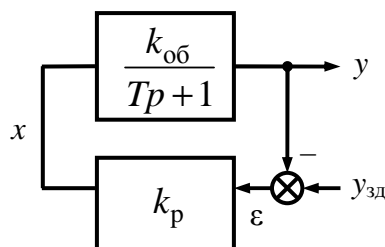


Рис. 1.49. Схема системи керування першого порядку

Характеристичне рівняння замкненої системи (див. (1.10))

$$1 + \frac{k_{об}}{Tp + 1} k_p = 0. \quad (1.69)$$

У такому вигляді воно не зовсім зручне для дослідження: ми ж очікуємо, що ліва частина характеристичного рівняння – поліном, тому спочатку зведемо рівняння (1.69) до виразу, в якому ліва частина набуде вигляду полінома, домноживши його ліву та праву частини на  $(Tp + 1)$ .

Отримаємо

$$Tp + 1 + k_{об}k_p = 0.$$

Якщо позначити  $a_1 = T$ ,  $a_0 = 1 + k_{об}k_p$ , то матимемо  $a_1p + a_0 = 0$ . А це вже знайоме нам рівняння (1.61). Отже, умови стійкості (1.62), з урахуванням введених позначень, можна переписати так:

$$\begin{cases} T > 0; \\ 1 + k_{об}k_p > 0. \end{cases} \quad (1.70)$$

Перша нерівність, схоже, проходить «на автоматі»: якщо об'єкт – аперіодична ланка першого порядку, то, як ми домовлялись, усі коефіцієнти (а отже, й  $T$ ) мають бути додатними, тому  $T$  і є додатним (у природі трапляються й об'єкти з від'ємним самовирівнюванням, у яких  $T < 0$ , щоправда, не часто).

І друга умова в системі нерівностей (1.70), якщо  $k_{об} > 0$  і  $k_p > 0$ , теж ніби не викликає сумніву. Та це коли зворотний зв'язок від'ємний. А якби він був додатним?

Тоді у рівнянні (1.69) після одиниці був би знак мінус, і  $a_0$  дорівнювало б  $1 - k_{об}k_p$ , а друга умова в (1.70) уже виглядала б так:

$$1 - k_{об}k_p > 0$$

або, що те саме,

$$k_{об}k_p < 1.$$

Якщо врахувати, що об'єкт зазвичай нам заданий таким, як він є, а впливати ми можемо лише на  $k_p$ , що є налагоджувальним параметром регулятора, то останню нерівність краще переписати так (звісно, за умови, що  $k_{об} > 0$ , але цю умову вже було введено):

$$k_p < \frac{1}{k_{об}}.$$

Тут виходить, що об'єкт (аперіодична ланка першого порядку) сам по собі стійкий. А регулятор (у разі додатного зворотного зв'язку) замість того, щоб допомагати об'єкту підтримувати стійкість у системі, діє деструктивно, погіршуючи умови стійкості. Поки  $k_p < 1/k_{об}$ , система ще якось тримається, а коли ця умова порушується (через збільшення  $k_p$ ) – стійкість втрачається.

Можна показати (це видно і з наведеного прикладу), що додатний зворотний зв'язок зазвичай шкодить стійкості системи, тому в разі автоматизації технологічних процесів віддають перевагу системам з від'ємним зворотним зв'язком. Тож надалі, як кажуть, за замовчанням (коли не обумовлено протилежне) вважатимемо, що системи, з якими маємо справу, це системи з від'ємним зворотним зв'язком. А за таких обставин зі стійкістю системи, показаної на рис. 1.49, як це видно з умов (1.70), усе гаразд.

Що більше  $k_p k_{об}$ , то надійніше виконується друга з умов (1.70), і тим краще зі стійкістю системи.

Трохи ускладнимо систему: скажімо, врахуємо інерційність датчика, вважаючи його, як і об'єкт, аперіодичною ланкою першого порядку:

$$W_{дат}(p) = \frac{k_{дат}}{T_{дат}p + 1}.$$

Структурну схему такої системи наведено на рис. 1.50.

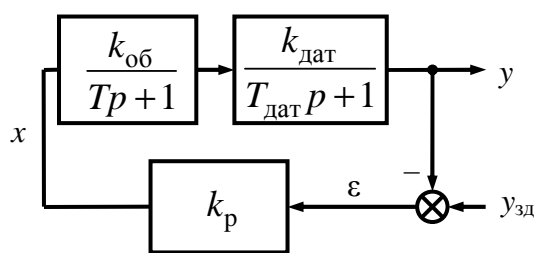


Рис. 1.50. Структурна схема системи другого порядку з інерційним датчиком і П-регулятором

Характеристичне рівняння цієї системи буде таким:

$$1 + \frac{k_{об} k_{дат} k_p}{(Tp + 1)(T_{дат}p + 1)} = 0,$$

або, що те саме,

$$(Tp + 1)(T_{дат}p + 1) + k_{об} k_{дат} k_p = 0.$$

Розкриваємо дужки та вводимо позначення:

$$a_2 = TT_{\text{дат}}; \quad a_1 = T + T_{\text{дат}}; \quad a_0 = 1 + k_{\text{роз}},$$

де  $k_{\text{роз}} = k_{\text{об}} k_{\text{дат}} k_p$  – коефіцієнт передачі розімкненої системи.

Характеристичне рівняння системи набуде вигляду

$$a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0.$$

Це рівняння (1.63), а умови стійкості (1.64), з урахуванням введених позначень, набувають вигляду

$$\begin{cases} TT_{\text{дат}} > 0; \\ T + T_{\text{дат}} > 0; \\ 1 + k_{\text{роз}} > 0. \end{cases}$$

Якщо  $T > 0$ ,  $T_{\text{дат}} > 0$ , зворотний зв'язок від'ємний, то проблемі зі стійкістю у цій системі виникнути немає з чого. А позаяк це система другого порядку, то необхідна умова стійкості є водночас і достатньою.

А тепер замінимо в останній системі П-регулятор на І-регулятор (рис. 1.51).

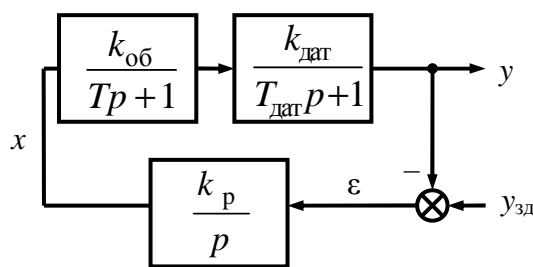


Рис. 1.51. Структурна схема системи з інерційним датчиком та І-регулятором

Характеристичне рівняння такої системи

$$1 + \frac{k_{\text{роз}}}{(Tp + 1)(T_{\text{дат}} p + 1)p} = 0$$

або

$$a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0, \quad (1.71)$$

де  $a_3 = TT_{\text{дат}}; a_2 = T + T_{\text{дат}}; a_1 = 1; a_0 = k_{\text{роз}}$ .

Рівняння (1.71) – це те саме (1.65). Умови стійкості (1.66) мають вигляд

$$\begin{cases} TT_{\text{дат}} > 0; \\ T + T_{\text{дат}} > 0; \\ 1 > 0; \\ k_{\text{роз}} > 0. \end{cases}$$

Це необхідні умови. До них слід додати умови достатності (1.68):

$$T + T_{\text{дат}} > TT_{\text{дат}} k_{\text{роз}}$$

або за умови, що  $TT_{\text{д}} > 0$  (а воно згідно з рівнянням (1.71) і має бути таким),

$$k_{\text{роз}} < \frac{T + T_{\text{дат}}}{TT_{\text{дат}}}. \quad (1.72)$$

З виразу (1.72) видно, що параметр  $k_{\text{роз}}$  має верхню межу, якої задля забезпечення стійкості системи переходити не можна.

А тепер у схемі попередньої системи об'єктом замість аперіодичної ланки візьмемо інтегральну (рис. 1.52), тобто маємо об'єкт без самовирівнювання.

Характеристичне рівняння

$$1 + \frac{k_{\text{роз}}}{(T_{\text{дат}} p + 1) p^2} = 0$$

або

$$a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0,$$

де  $a_3 = T_{\text{дат}}$ ;  $a_2 = 1$ ;  $a_1 = 0$ ;  $a_0 = k_{\text{роз}}$ .

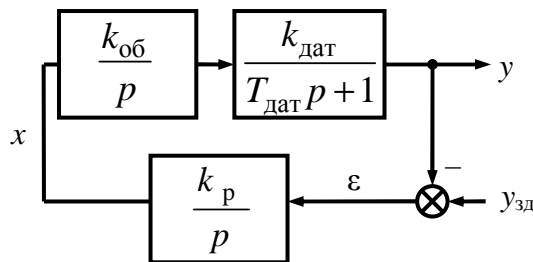


Рис. 1.52. Система з об'єктом без самовирівнювання та з І-регулятором

Необхідна умова стійкості вимагає, щоб усі коефіцієнти були строго додатними. Але нуль (а  $a_1 = 0$ ) не є строго додатним, тому необхідна умова не виконується. До того ж – ніколи, адже як не мінняй у системі  $T_{\text{дат}}$  чи  $k_{\text{роз}}$ , а коефіцієнт  $a_1$  залишиться нулем. Таку систему називають структурно нестійкою, тобто невіправно нестійкою. Вихід один: не використовувати для регулювання об'єкта без самовирівнювання І-регулятор (якщо ні об'єкт, ні регулятор не прагнуть стійкості за визначенням, то звідки їй узятись у цій системі?).

Вважатимемо, що з критерієм стійкості Гурвиця, в принципі, усе більш-менш зрозуміло. Для систем до третього порядку кращого показника й бажати не доводиться: все як на долоні, та й розрахунків не багато. А що як система матиме п'ятий, сьомий або ще вищий порядок?

Тоді все значно ускладнюється, позаяк умови стійкості стають все більш громіздкими. Та як усе-таки досліджувати властивості системи, порядок

моделі якої вищий за той, із яким легко розібратися за допомогою критерію Гурвиця? Доведеться вдатися до інших критеріїв стійкості.

**Критерій Михайлова** або *принцип аргумента* належить до групи частотних критеріїв. У цьому критерії, як і в критерії Гурвиця, інформація про динамічні властивості системи задається характеристичним поліномом системи  $A(p)$  (1.9). Заміною змінної  $p = j\omega$  характеристичний поліном (у формі коли  $a_0 > 0$ ) перетворюють у функцію Михайлова:

$$A(j\omega) = A(p)|_{p=j\omega} = a_n (j\omega)^n + a_{n-1} (j\omega)^{n-1} + \dots + a_1 j\omega + a_0.$$

Для конкретності нехай  $n = 6$ . Тоді

$$A(p) = a_6 p^6 + a_5 p^5 + a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0, \quad (1.73)$$

$$A(j\omega) = R(\omega) + jI(\omega),$$

де  $R(\omega) = a_0 - a_2\omega^2 + a_4\omega^4 - a_6\omega^6$ ;  $I(\omega) = \omega(a_1 - a_3\omega^2 + a_5\omega^4)$ .

Зверніть увагу – формули для дійсної  $R(\omega)$  та уявної  $I(\omega)$  частин функції Михайлова у (1.73) – не складні, й алгоритм їх формування достатньо прозорий (як для ручного розрахунку, так і для комп'ютера).

Тепер потрібно перебрати низку значень параметра  $\omega$  (частоти) і побудувати (бодай якісно) годограф функції Михайлова (годограф Михайлова) у діапазоні частот  $0 \leq \omega \leq \infty$ . Ширина діапазону видається, на перший погляд, надто великою. Однак справа полегшується тим, як саме ми збираємось використовувати цей годограф: нам потрібно буде оцінити тільки сумарний (результівний) кут повороту вектора функції Михайлова зі зміною частоти  $\omega$  від 0 до  $\infty$  і за ним робити висновок щодо стійкості системи.

Критерій Михайлова можна сформулювати так: *щоб система була стійкою, необхідно і достатньо, щоб за зміни частоти  $\omega$  від 0 до  $\infty$  вектор Михайлова повертався б на кут  $n\pi/2$ , де  $n$  – порядок системи (ступінь її характеристичного полінома).*

Можна ще простіше: *для стійкості системи  $n$ -го порядку необхідно і достатньо, щоб за зміни частоти  $\omega$  від 0 до  $\infty$  годограф Михайлова проходив у природній послідовності  $n$  квадрантів.* Отже, комп'ютер буде годограф Михайлова, а ви як експерт визначаете, чи в природній – це значить, спочатку перший, потім другий і так аж до  $n$ -го – послідовності годограф обходить усі належні квадранти комплексної площини.

Розглянемо це на прикладах. Нехай для початку  $n = 1$ . Характеристичний поліном цієї системи (див. (1.61))

$$A(p) = a_1 p + a_0.$$

Функція Михайлова

$$A(j\omega) = a_0 + ja_1\omega. \quad (1.74)$$



Годограф функції Михайлова (1.74) показано на рис. 1.53.

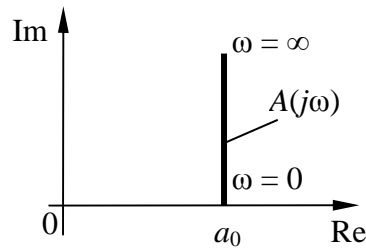


Рис. 1.53. Годограф Михайлова для стійкої системи першого порядку

Як бачимо, зі зміною частоти  $\omega$  від 0 до  $\infty$  годограф (1.74) проходить у природній послідовності (від 1 до  $n = 1$ ) перший квадрант, отже, система стійка (це поки  $a_0 > 0$  і  $a_1 > 0$  – інакше за  $a_1 < 0$  годограф пішов би вниз – у четвертий квадрант, а така його поведінка свідчила б про нестійкість досліджуваної системи).

Тепер  $n = 2$ . Характеристичний поліном такої системи (див. (1.63))

$$A(p) = a_2 p^2 + a_1 p + a_0,$$

функція Михайлова

$$A(j\omega) = a_0 - a_2 \omega^2 + ja_1 \omega. \quad (1.75)$$

Вигляд годографа функції Михайлова (1.75) наведено на рис. 1.54.

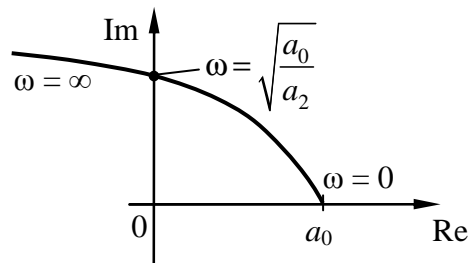


Рис. 1.54. Годограф Михайлова стійкої системи другого порядку

Якщо необхідні умови стійкості виконуються, то, схоже, тут проблемі з'явитися немає звідки. До речі, перед тим як скористатися критерієм Михайлова, варто перевірити виконання необхідної умови стійкості (1.68). Якщо ж необхідні умови не виконуються, то і без годографа Михайлова зрозуміло, що система нестійка. Надалі так і вчинятимемо.

Нехай  $n = 3$ . Характеристичний поліном – див. (1.65):

$$A(p) = a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0.$$

Функція Михайлова

$$A(j\omega) = a_0 - a_2 \omega^2 + j\omega(a_1 - a_3 \omega^2). \quad (1.76)$$

Годограф функції Михайлова (1.76) наведено на рис. 1.55.

Крива 1 проходить послідовно квадранти перший, другий і третій – система стійка. Крива 2 проходить перший, четвертий і третій квадранти – природну послідовність порушено – система нестійка.

Для кривої 1

$$\sqrt{\frac{a_1}{a_3}} > \sqrt{\frac{a_0}{a_2}},$$

що еквівалентно (необхідні умови виконуються!) виразу

$$a_1 a_2 > a_0 a_3.$$

Але ж цього самого вимагають і умови (1.66), (1.67), тобто і критерій Михайлова, і критерій Гурвиця діють однаково. Інакше і не може бути. Стійка система чи нестійка – це залежить від властивостей самої системи, а не від будь-яких оцінкових критеріїв.

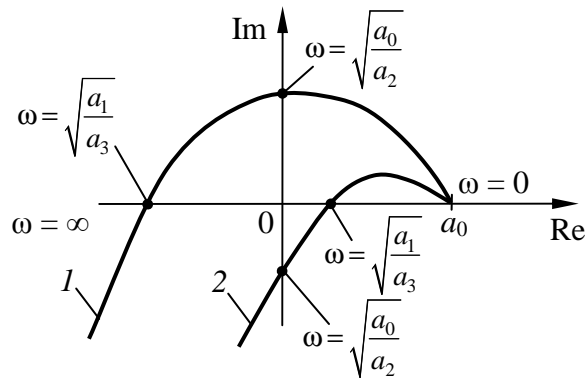


Рис. 1.55. Годографи Михайлова систем третього порядку: 1 – стійкої; 2 – нестійкої

Об'єкти з розподіленими параметрами математично описуються трансцендентними (не дробово-раціональними) передавальними функціями. Трансцендентні чисельник та (чи) знаменник будь-якої трансцендентної передавальної функції можна подати у вигляді нескінченного ряду – полінома нескінченного степеня від  $p$ . Отже, характеристичний поліном (і замкненої системи зокрема) має нескінченно високий ступінь, а сама система – нескінченно високий порядок. Досліджувати її за допомогою визначника Гурвиця нескінченно високого порядку (спробуйте уявити визначник і критерій Гурвиця нескінченно високого порядку), як і відслідковувати нескінченну кількість витків годографа Михайлова навколо початку координат (і не пропустити жодного порушення природної послідовності переходу його із квадранта в квадрант) надто складно, особливо, якщо не перекладати цю задачу на комп'ютер. Між тим об'єкти (елементи системи автоматизації) з розподіленими параметрами в хімії, енергетиці, харчовій промисловості тощо радше не виняток, а правило. А коли так, то і системи, до складу яких увійшов бодай один елемент з розподіленими параметрами – це система

нескінченно високого порядку ( $n = \infty$ ). І проблем зі стійкістю в таких системах аж ніяк не менше – навпаки. Тому перейдемо до розгляду критерію, здатного вирішити цю проблему.

**Критерій Найквіста** дає змогу досліджувати стійкість систем як із зосередженими, так і з розподіленими параметрами. Сформулювати його можна, наприклад, так: коли систему, яка в розімкненому стані стійка або нейтральна (на межі стійкості), замкнути, то після замикання вона залишиться стійкою, якщо годограф амплітудно-фазової характеристики розімкненої системи зі зміною частоти  $\omega$  від 0 до  $\infty$  не охоплюватиме точки  $(-1 + j0)$ . Охоплюваною вважають ділянку праворуч від спостерігача, що рухається вздовж годографа  $W_{роз}(j\omega)$  в бік збільшення частоти  $\omega$ .

У формулюванні критерію Найквіста порядок системи не згадується. Тож буде  $n$  дорівнювати 1, 2, ...,  $n$  чи  $\infty$  не суттєво, адже порядок досліджуваної системи при цьому враховувати взагалі не потрібно – у цьому й полягає універсальність цього критерію.

Продемонструємо застосування критерію Найквіста на прикладах різних систем керування.

Отже  $n = 1$ , тобто система керування першого порядку (рис. 1.49):

$$W_{об}(p) = \frac{k_{об}}{Tp + 1};$$

$$W_{рег}(p) = k_p.$$

Для розімкненої системи

$$W_{роз}(p) = \frac{k_{роз}}{Tp + 1},$$

де  $k_{роз} = k_{об}k_p$ .

Амплітудно-фазова характеристика розімкненої системи  $W_{роз}(j\omega)$  – це півколо у четвертому квадранті – як для аперіодичної ланки першого порядку. Годограф  $W_{роз}(j\omega)$  і точку  $(-1 + j0)$  зображено на рис. 1.56.

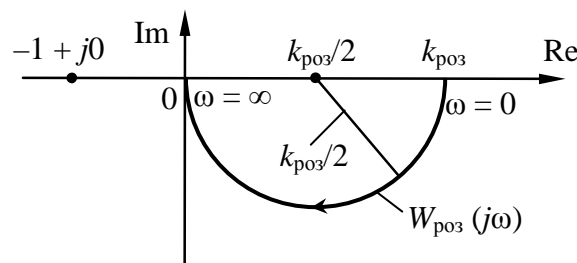


Рис. 1.56. Дослідження стійкості системи першого порядку за критерієм Найквіста

Не важко переконатися, що годограф  $W_{роз}(j\omega)$  точку  $(-1 + j0)$  не охоплює, тож замкнена система стійка.

Для системи, структурну схему якої показано на рис. 1.50, передавальну функцію можна записати у вигляді

$$W_{\text{роз}}(p) = \frac{k_{\text{роз}}}{(Tp + 1)(T_{\text{дат}}p + 1)},$$

де  $k_{\text{роз}} = k_{\text{об}}k_{\text{дат}}k_p$ .

Годограф амплітудно-фазової характеристики розімкненої системи  $W_{\text{роз}}(j\omega)$  наведено рис. 1.57. Легко бачити, що й ця система стійка.

Дослідимо систему, показану на рис. 1.51. Передавальна функція розімкненої системи має вигляд

$$W_{\text{роз}}(p) = \frac{k_{\text{роз}}}{(Tp + 1)(T_{\text{дат}}p + 1)p}.$$

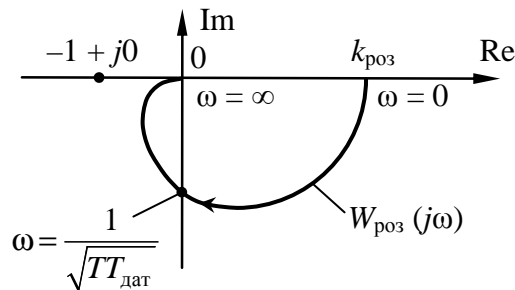


Рис. 1.57. Дослідження за критерієм Найквіста стійкості системи другого порядку, структурну схему якої показано на рис. 1.50

Годограф амплітудно-фазової характеристики розімкненої системи  $W_{\text{роз}}(j\omega)$  наведено рис. 1.58.

Тут не наведено розрахункових формул для побудови годографа  $W_{\text{роз}}(j\omega)$ . Читач може сам зробити заміну  $p = j\omega$  у виразі  $W_{\text{роз}}(p)$  та провести елементарні перетворення, знайти частоту  $\omega$ , за якої годограф перетне дійсну вісь, а також значення  $W_{\text{роз}}(j\omega)$  за цієї частоти.

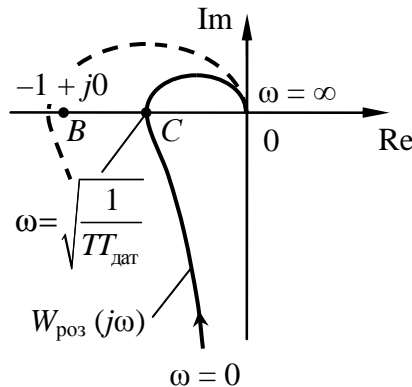


Рис. 1.58. Дослідження за критерієм Найквіста стійкості системи другого порядку, структурну схему якої показано на рис. 1.51

Для точки  $C$  перетину годографа  $W_{\text{роз}}(j\omega)$  з віссю  $\text{Re}$  маємо:

$$0C = k_{\text{роз}} \frac{TT_{\text{дат}}}{T + T_{\text{дат}}}. \quad (1.77)$$

Якщо  $0C < 1$ , то  $W_{\text{роз}}(j\omega)$  точки  $(-1 + 0j)$  охоплювати не буде. До речі,  $0C < 1$  означає, що

$$k_{\text{роз}} \frac{TT_{\text{дат}}}{T + T_{\text{дат}}} < 1,$$

тобто цілковито збігається з умовою (1.72) Гурвиця.

Якщо збільшувати  $k_{\text{роз}}$ , то згідно з виразом (1.77) збільшуватиметься й відрізок  $0C$  (див. рис. 1.58), аж поки годограф  $W_{\text{роз}}(j\omega)$  системи не охопить точку  $(-1 + j0)$ . Взагалі-то аналіз цих систем на стійкість можна було виконувати (і ми це робили) з використанням критеріїв Гурвиця та Михайлова. Особливої переваги критерій Найквіста тут не виявляє.

Розглянемо систему з ланкою транспортного запізнення у контурі та П-регулятором (рис. 1.59).

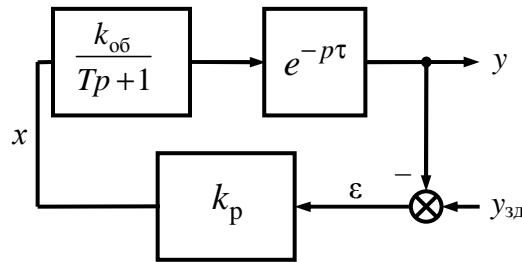


Рис. 1.59. Дослідження стійкості системи з транспортним запізненням у контурі за критерієм Найквіста

Характеристичне рівняння цієї системи

$$1 + \frac{k_{\text{роз}}}{Tp + 1} e^{-p\tau} = 0,$$

де  $k_{\text{роз}} = k_{\text{об}}k_p$ .

Домножимо його на  $(Tp + 1)$ :

$$Tp + 1 + k_{\text{роз}} e^{-p\tau} = 0. \quad (1.78)$$

Експонента  $e^{-p\tau}$  розкладається в ряд

$$e^{-p\tau} = 1 - \tau p + \frac{\tau^2}{2!} p^2 - \frac{\tau^3}{3!} p^3 + \dots$$

Підставимо цей ряд у рівняння (1.78) і для зручності поділимо на  $k_{\text{роз}}$ :

$$1 + \frac{1}{k_{\text{роз}}} + \left( \frac{T}{k_{\text{роз}}} - \tau \right) p + \frac{\tau^2}{2!} p^2 - \frac{\tau^3}{3!} p^3 + \dots = 0. \quad (1.79)$$

У лівій частині характеристичного рівняння (1.79) маємо узагальнений поліном, тобто поліном нескінченно високого степеня. Записаний, щоправда, у зворотному порядку, але, як відомо, від перестановки доданків сума не змінюється. З критеріями Гурвиця та Михайлова до нього не підступишся, тому спробуємо скористатися критерієм Найквіста.

Передавальна функція розімкненої системи

$$W_{\text{роз}}(j\omega) = \frac{k_{\text{роз}}}{Tp + 1} e^{-p\tau}.$$

Відповідно, амплітудно-фазова характеристика

$$W_{\text{роз}}(j\omega) = \frac{k_{\text{роз}}}{1 + jT\omega} e^{-j\omega\tau}. \quad (1.80)$$

Перетворимо дріб до вигляду

$$\frac{k_{\text{роз}}}{1 + jT\omega} = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)},$$

де  $A(\omega) = \frac{k_{\text{роз}}}{\sqrt{1 + (T\omega)^2}}$ ;  $\varphi(\omega) = -\text{arctg}(T\omega)$ .

Тоді вираз (1.80) можна записати так:

$$W_{\text{роз}}(j\omega) = A(\omega) e^{j[\varphi(\omega) - \omega\tau]}. \quad (1.81)$$

Запис АФХ (1.81) показує, що кожен вектор  $\frac{k_{\text{роз}}}{1 + jT\omega}$  повертається на кут  $\omega\tau$  за стрілкою годинника – це проілюстровано на рис. 1.60.

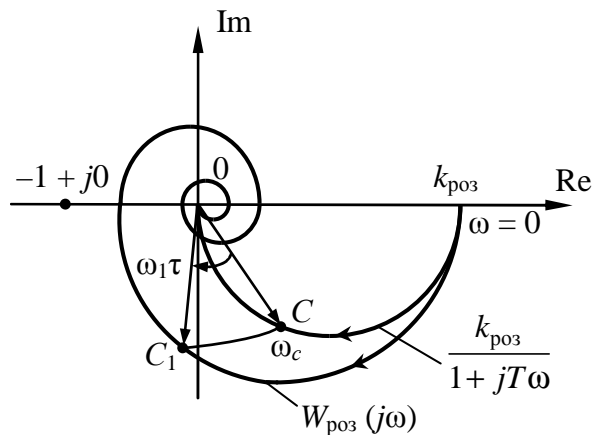


Рис 1.60. Дослідження стійкості системи із запізненням за критерієм Найквіста

Вектор  $\overline{OC}$  для якої частоти  $\omega_C$  повертається за стрілкою годинника на кут  $\omega_1\tau$ , і точка  $C$  переміщується в точку  $C_1$ . В результаті годограф  $W_{\text{роз}}(j\omega)$  за рахунок запізнення ніби «роздувається», особливо в області високих частот.

За  $\tau = 0$  годограф  $W_{\text{роз}}(j\omega)$  мав би вигляд півкола  $\left[ \frac{k_{\text{роз}}}{1 + jT\omega} \right]$ , а так набуває вигляду спіралі. При цьому очевидно, що чим більше  $\tau$  (запізнення), тим більш вираженим стає ефект «роздування», і тим імовірнішим стає охоплення годографом  $W_{\text{роз}}(j\omega)$  «критичної» точки  $(-1 + j0)$ , а отже, і втрата стійкості замкненою системою (за Найквістом). Тож, як бачимо, запізнення негативно позначається на стійкості системи (майже завжди).

## 1.9. ЯКІСТЬ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Стійкість, безперечно, дуже важлива та необхідна умова працездатності системи керування, але цього може виявитись недостатньо, щоб функціонування системи можна було вважати принаймні задовільним (а хотілося б – хорошим, навіть відмінним). Кому сподобається система, яка хоч урешті-решт повертається до попереднього стану рівноваги (стійка), але робить це дуже й дуже повільно, попри те, що в керованому нею об'єкті (найчастіше це якийсь динамічний процес) відбуваються небажані зміни?

Тому, крім стійкості, до системи керування висувають і певні вимоги щодо якості, під якою розуміють сукупність показників, які прямо чи опосередковано характеризують якість її роботи.

**Точнісні показники якості.** Поведінка системи в усталеному режимі, яка характеризує її точнісні властивості, залежить від вигляду вхідного (задавального) впливу, тобто функції  $u_{\text{зд}}(t)$ . Найпростіше точність системи оцінюється в задачах стабілізації, коли задавальний вплив має усталене значення  $u_{\text{уст}}$  регульованого параметра  $y$ . Розглянемо рух усталеної системи за  $u_{\text{зд}} = \text{const}$  і достатньо великих  $t$ , тобто  $t \gg t_{\text{пр}}$  – це забезпечує досягнення керованим параметром значення  $u_{\text{уст}}$  (рис. 1.61).

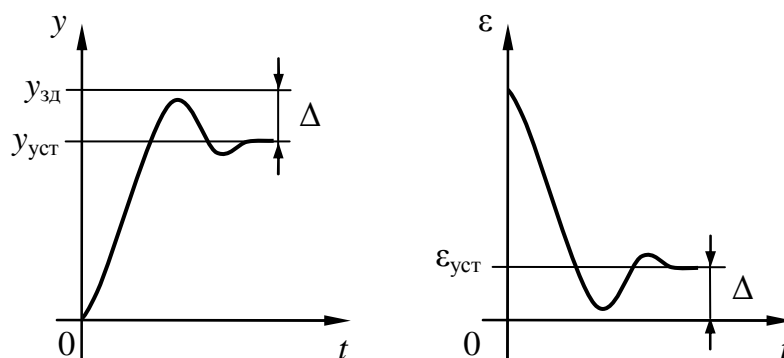


Рис. 1.61. Перехід до усталеного режиму в задачі стабілізації

Усталена похибка за постійного зовнішнього впливу називається *статичною похибкою*. Система називається *статичною*, якщо статична похибка відмінна від нуля, і *астатичною*, якщо статична похибка дорівнює нулю.

Абсолютною похибкою такої системи називається додатне число

$$\Delta = |\varepsilon_{\text{уст}}| = |y_{\text{зд}} - y_{\text{уст}}|,$$

а відносною похибкою – значення

$$\delta = \left| \frac{\Delta}{y_{\text{зд}}} \right| = \left| \frac{y_{\text{зд}} - y_{\text{уст}}}{y_{\text{зд}}} \right|.$$

Знайдемо усталену похибку:

$$\varepsilon_{\text{уст}} = y_{\text{зд}} - y_{\text{уст}}.$$

Слід зазначити, що в лінійних системах відносна похибка не залежить від величини вхідного (задавального) впливу.

Розглянемо систему, структурну схему якої наведено на рис. 1.62. Визначимо усталене значення похибки регулювання  $\varepsilon$  для одиничного збурення  $\lambda = 1(t)$ . Передавальну функцію замкненої системи для каналу « $\lambda \rightarrow \varepsilon$ » запишемо так:

$$W_{\lambda \rightarrow \varepsilon}(p) = \frac{W_{\text{оз}}(p)}{1 + W_{\text{об}}(p)k_p}, \quad (1.82)$$

де  $W_{\text{оз}}(p)$  – передавальна функція ОК для каналу збурення.

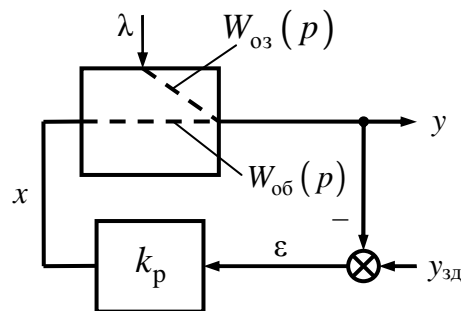


Рис. 1.62. Структурна схема замкненої системи, на яку діє зовнішнє збурення  $\lambda$

Легко показати [22], що усталене  $h_{\text{уст}}$  значення перехідної характеристики (реакції на вхід  $\lambda = 1(t)$ ) визначається за формулою

$$\lim_{t \rightarrow \infty} h(t) = \lim_{p \rightarrow 0} W(p). \quad (1.83)$$

Підставляючи замість  $W(p)$  у формулу (1.83) передавальну функцію (1.82), матимемо

$$h_{\lambda \rightarrow \varepsilon}^{\text{уст}} = \left. \frac{W_{\text{оз}}(p)}{1 + W_{\text{об}}(p)k_p} \right|_{p=0}. \quad (1.84)$$



Якщо об'єкт, для прикладу, має самовирівнювання, то  $W_{03}(p)|_{p=0} = k_{03}$ ,  $W_{06}(p)|_{p=0} = k_{06}$ , і з виразу (1.84) отримуємо:

$$h_{\lambda \rightarrow \varepsilon}^{\text{уст}} = \frac{k_{03}}{1 + k_{06}k_p}. \quad (1.85)$$

Права частина виразу (1.85) на нуль не схожа, а отже, похибка  $\varepsilon_y$  буде усталеною (неусувною). Вона буде тим меншою, чим більший  $k_p$  (це якраз той чинник, на який ми можемо впливати під час налагодження регулятора), але збільшення  $k_p$  може наштовхуватись на технічні (й економічні) протипоказання (наприклад, збільшення потужності двигуна, збільшення витрат енергії тощо), та й зі стійкістю системи, як уже зазначалося, можуть виникати проблеми.

Замінімо П-регулятор на І-регулятор – замість виразу (1.82) матимемо:

$$W_{\lambda \rightarrow \varepsilon}(p) = \frac{W_{03}(p)}{1 + W_{06}(p)\frac{k_p}{p}} = \frac{pW_{03}(p)}{p + W_{06}(p)k_p},$$

а

$$h_{\lambda \rightarrow \varepsilon}^{\text{уст}} = \left. \frac{pW_{03}(p)}{p + W_{06}(p)k_p} \right|_{p=0} = 0. \quad (1.86)$$

З цього можна зробити деякі узагальнення. Системи з П-регулятором мають неусувну статичну похибку. Втім, цей регулятор простий, надійний, оперативний (швидко приводить керований об'єкт до нового зрівноваженого стану після дії на нього збурення). Щоправда, є й вада: він виконує свою роботу дещо грубо – завжди з більшою чи меншою похибкою. А от І-регулятор – цілковита протилежність П-регулятору: він не «заспокоїться», поки не доведе, як це видно з виразу (1.86), похибки регулювання до нуля. Але процес доведення може дуже затягнутися, тобто оперативність його роботи погіршиться. Тут і до втрат стійкості не далеко, позаяк системи з інтегральними регуляторами більш імовірно можуть втрачати стійкість – така «плата» за бездоганну статичну точність.

**Показники якості в перехідному режимі.** Вони поділяються на прямі та непрямі (опосередковані), які в свою чергу поділяються на кореневі, частотні та інтегральні.

*Прямими показниками якості* називають показники, які отримують безпосередньо з перехідної характеристики. Під час експлуатації системи автоматичного керування важливо, як вона себе поводить у процесі керування: реагує на збурення швидко чи повільно, перехідні процеси аперіодичні чи коливальні, якщо коливальні, то з якою частотою й амплітудою відбуваються, як швидко згасають коливання тощо. Перехідний процес може мати багато граней (показників), тож охарактеризувати його одним показником – майже неможливо. Взагалі-то скільки збурень – стільки й

перехідних процесів, але для спрощення викладу нехай це буде перехідна характеристика такого вигляду, як показано на рис. 1.63,  $a^7$ .

З прямих показників найчастіше використовують час перехідного процесу та перерегулювання. Теоретично перехідний процес у лінійній системі триває нескінченно довго. На практиці за час *перехідного процесу* беруть час  $t_{\text{пн}}$ , потрібний системі для того, щоб перехідна характеристика  $h(t)$  увійшла в зону  $h_{\text{уст}} \pm \varepsilon$  (і надалі залишалась там), де  $\varepsilon$  – деяка наперед задана величина (зазвичай  $\pm 5\%$  від  $h_{\text{уст}}$ ). Отже,  $t_{\text{пн}}$  – відносна величина: що менше  $\varepsilon$ , то більше  $t_{\text{пн}}$  (його ще називають *часом регулювання*).

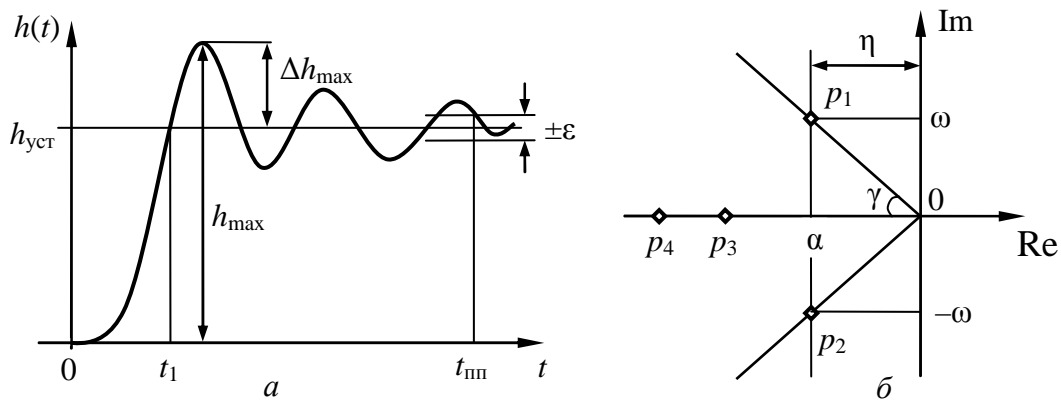


Рис. 1.63. Прямі показники якості перехідної характеристики:  
 $a$  – динамічні;  $b$  – кореневі

З графіка перехідного процесу (рис. 1.63,  $a$ ) також отримуємо час  $t_1$  першого (прямого) виходу перехідної функції на усталений рівень, максимальне значення перехідної функції  $h_{\text{max}}$  і величину першого «викиду»  $\Delta h_{\text{max}} = h_{\text{max}} - h_{\text{уст}}$ . Відносне значення першого «викиду» перехідної функції, тобто число

$$\sigma = \left| \frac{h_{\text{max}} - h_{\text{уст}}}{h_{\text{уст}}} \right| \cdot 100\%$$

називається *перерегулюванням*. Іншими словами, перерегулюванням називається максимальне відхилення перехідної функції  $\Delta h_{\text{max}}$  від усталеного значення  $h_{\text{уст}}$ , виражене у відсотках по відношенню до  $h_{\text{уст}}$ .

<sup>7</sup> Як уже зазначалося, перехідна характеристика є реакцією засобу вимірювання, об'єкта чи системи керування на зміну вхідного сигналу у вигляді одиничної східчастої функції. Оскільки заздалегідь невідомо, яким у реальних умовах буде вхідний сигнал, для аналізу якості вибирають певний (типовий) *тестовий* вхідний сигнал. Такий підхід цілком виправданий, оскільки є кореляція між реакцією системи на типовий вхідний сигнал і її поведінкою у реальних робочих умовах. Крім того, використання типового вхідного сигналу дає змогу проектувальникові порівняти кілька варіантів створеної системи. До того ж, багато систем керування в процесі експлуатації піддаються зовнішнім впливам, які за виглядом дуже близькі до тестових сигналів. Як типові тестові сигнали зазвичай використовують східчастий, лінійний або параболічний сигнали. Лінійний сигнал є інтегралом від східчастого, а параболічний – інтегралом від лінійного. Можна показати, що реакцію на один тестовий сигнал завжди можна виразити через реакцію на інший тестовий сигнал, оскільки ж східчастий вхідний сигнал найбільш простий, то його найчастіше й використовують як тестовий для оцінювання якості системи.

Серед *опосередкованих показників якості* становлять інтерес так звані кореневі (йдеться, передусім, про корені характеристичного полінома системи). Як і відповідні критерії стійкості, вони дають змогу виконати аналіз системи, не вдаючись до числових визначень – на підставі опосередкованих ознак і властивостей математичної моделі.

Корені характеристичного рівняння на рис. 1.63, б показані у вигляді ромбиків. Така картина розміщення коренів дає змогу зробити певні висновки та ввести деякі кореневі показники якості.

1. Це система, як можна було довідатись за допомогою критеріїв Гурвиця, Михайлова та інших, стійка (усі корені розміщено ліворуч від уявної осі).

2. Система схильна до коливань – про це свідчить комплексно-спряжена пара коренів  $p_{1,2} = \alpha \pm j\omega$ .

3. Частота коливальної складової  $\omega$  (уявна частина комплексного кореня  $p_1$ ) відповідає періоду коливань

$$T_k = \frac{2\pi}{\omega}.$$

4. Темп згасання коливальної складової можна охарактеризувати, наприклад, тангенсом кута  $\gamma$  – це кут нахилу променя, що обмежує сектор, у який потрапляють усі корені:

$$\operatorname{tg}\gamma = \left| \frac{\omega}{\alpha} \right|.$$

Цей показник ще називають *ступенем коливальності*  $\mu$  або *коливальністю* системи. Якщо ступінь коливальності  $\mu = 0$ , то перехідний процес буде аперіодичним.

5. *Ступенем стійкості*  $\eta$  системи керування називають відстань від уявної осі до найближчого кореня характеристичного полінома системи). Коли система стійка (найбільш правий корінь розміщується лівіше від уявної осі), ступінь стійкості вважається додатним, в іншому разі – від'ємним.

Ступінь стійкості характеризує також швидкодію системи. Це зумовлено тим, що швидкість загасання перехідного процесу багато в чому визначається дійсною частиною найближчого до уявної осі кореня.

Список показників якості можна продовжити.

Кореневі показники (поряд із іншими) й досі використовують для задач синтезу (система добра–погана – це аналіз, а от з'ясування того, що слід зробити, аби вона була такою, як треба, – це вже синтез). Розрізняють структурний і параметричний види синтезу. Перший – це коли синтезується, тобто створюється, структура системи. Другий – це налагодження вже синтезованої системи: коефіцієнт передачі  $k_p$  збільшити,  $T_{із}$  зменшити,  $T_d$  – зробити нулем тощо. Логічно очікувати, що здійснення синтезу забезпечить очікуваний (оптимальний) результат функціонування системи керування.

## 1.10. ПАРАМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ КОРЕНЕВИХ ГОДОГРАФІВ

Бажано мати якийсь метод (алгоритм), що дав би змогу відслідковувати тенденції впливу окремих параметрів системи, які піддаються варіюванню й називаються параметрами налагодження, на її поведінку в динаміці. Тоді можна було б осмислено варіювати згадані параметри (в потрібному напрямку, до певної межі, перевищувати яку не слід). Простіше за все варіювати  $k_p$  – коефіцієнт передачі регулятора. Він наявний у будь-якому з розглянутих регуляторів – від П- до ПІД-регулятора. Вплив  $k_{роз}$  (пропорційного  $k_p$ ) на динаміку замкнених систем саме і дає змогу аналізувати **метод кореневих годографів**.

Ми вже мали змогу пересвідчитись (з усіх раніше розглянутих прикладів систем), що принаймні деякі коефіцієнти характеристичного рівняння замкненої системи залежать від  $k_p$ , а отже, й від  $k_{роз}$  (одні більше, другі – менше, але залежать усі). Якщо ж потихеньку змінювати  $k_{роз}$  від 0 до  $\infty$ , то корені характеристичного рівняння почнуть «розповзатися» по комплексній площині. Сліди (траєкторії), які вони залишатимуть після себе, називають *кореневими годографами*. Не так важко навчити комп'ютер будувати кореневі годографи. А якщо трохи набити руку, то можна і «на око», бодай ескізно «малювати» їх для не надто складних систем. Для цього варто ознайомитись із декількома елементарними правилами [16].

1. *Кореневі годографи – це неперервні криві, симетричні відносно дійсної осі.*

2. Кореневий годограф системи  $n$ -го порядку має  $n$  гілок (поліном  $n$ -го степеня повинен мати  $n$  коренів, кожен з яких має право «повзати»).

3. Гілки кореневого годографа починаються у полюсах передавальної функції розімкненої системи, а закінчуються у її нулях.

Надамо деякі пояснення. Передавальну функцію розімкненої системи (дробово-раціональну) будемо подавати так:

$$W_{роз}(p) = k \frac{(p - p_1^H) \dots (p - p_m^H)}{(p - p_1^N) (p - p_2^N) \dots (p - p_n^N)}, \quad (1.87)$$

де  $k$  – коефіцієнт, пропорційний  $k_{роз}$  (розберемо на прикладах);  $p_1^H, p_2^H, p_m^H$  – так звані нулі (вони перетворюють  $W_{роз}(p)$  на нуль);  $p_1^N, p_2^N, \dots, p_n^N$  – полюси (перетворюють  $W_{роз}(p)$  на  $\infty$ ).

Вважатимемо, що гілки кореневого годографа починаються за  $k = 0$ , а закінчуються за  $k = \infty$ . До того ж, є загальнозживана умова фізичної реалізованості динамічних систем. Стосовно систем, описуваних дробово-раціональними передавальними функціями (тут розглядаються саме такі), умова фізичної реалізованості виглядає так:

$$m \leq n.$$

Тут, як і у виразі (1.87),  $m$  – степінь полінома-чисельника передавальної функції  $W_{\text{роз}}(p)$  (визначає кількість нулів), а  $n$  – степінь полінома-знаменника  $W_{\text{роз}}(p)$  (визначає кількість полюсів). Отже, проблема виникає тоді, коли  $m < n$  (а це якраз найчастіше й трапляється), оскільки тоді виходить, що  $n$  гілок вийшло (з полюсів), а лише  $m$  (а  $m < n$ ) прийшло (в нулі).

Характеристичне рівняння замкненої системи (а це його корені «малюють» гілки кореневих годографів) можна записати у вигляді

$$1 + k \frac{B(p)}{A(p)} = 0, \quad (1.88)$$

де  $B(p)$  – поліном  $m$ -го степеня;  $A(p)$  – поліном  $n$ -го степеня.

Рівняння (1.88) можна записати і так:

$$A(p) + kB(p) = 0. \quad (1.89)$$

Якщо  $k = 0$  (початок гілок), рівняння (1.89) вироджується в

$$A(p) = 0.$$

Але ж це – характеристичне рівняння розімкненої системи (згадайте, характеристичне рівняння замкненої системи – це знаменник її передавальної функції, прирівняний до нуля). Виходить, замкнена система виродилась (перетворилась) у розімкнену? Це закономірно, оскільки  $k$  (а отже, і  $k_{\text{роз}}$ ) дорівнює нулю. От вам і початок в полюсах (за  $k = 0$ ), адже  $A(p)$  стоїть у знаменнику передавальної функції  $W_{\text{роз}}(p)$  розімкненої системи.

А тепер поділимо рівняння (1.89) на  $k$ :

$$\frac{1}{k} A(p) + B(p) = 0.$$

Для  $k = \infty$  отримаємо:

$$B(p) = 0.$$

Характеристичний поліном замкненої системи перетворився в  $B(p)$  – чисельник  $W_{\text{роз}}(p)$  – звідси й нулі, в яких мають закінчуватись (за  $k = \infty$ ) гілки кореневих годографів. Якщо ж  $m < n$ , то, значить, відбулося пониження порядку системи. Це сталося тому, що частина  $(n-m)$  старших коефіцієнтів поступово (за рахунок ділення на дедалі зростаюче  $k$ ) зійшла на ніщо. Математики стверджують, коли старший коефіцієнт полінома наближається до нуля, то один із коренів цього полінома наближається до  $\infty$ . Тож, якщо  $(n-m)$  старших коефіцієнтів онуляються, то  $(n-m)$  гілок кореневого годографа попрямують у нескінченність. Оскільки для них (полюсів) немає відповідних їм нулів (нуль-полюс – пара), вони – «відходять». Утім, можна встановити, в якому саме напрямку вони рухаються у ту нескінченність – на це вказує наступна властивість кореневих годографів.

4. *Асимптоти.* Якщо  $k \rightarrow \infty$ , то  $(n-m)$  гілок кореневого годографа наближаються до прямих (асимптот), які перетинаються в одній точці на дійсній осі.

Абсциса цієї точки

$$\sigma_a = \frac{\sum_{i=1}^n p_i^{\text{п}} - \sum_{i=1}^m p_i^{\text{н}}}{n-m}, \quad (1.90)$$

а кути нахилу окремих асимптот

$$\theta_a = \frac{2q+1}{n-m} \pi,$$

де  $q = 0, 1, 2, \dots, n-m-1$ .

Кореневі годографи можна уявляти собі, наприклад, як траєкторії однакових за величиною додатних зарядів (полюсів), якщо від'ємні заряди (нулі) зафіксувати на комплексній площині, а полюси відпустити. Частина з них (кількість їх  $m$ ) швиденько «попрямує» до найближчих нулів (у міру наближення пара полюс–нуль утворює спочатку так званий диполь, а далі справа закінчується злиттям). Ті, що не знайшли собі пари, «розлітаються» в різні сторони (однойменні заряди відштовхуються). При цьому центр (точка перетину) усіх гілок-траєкторій залишається на старому місці – згідно з формулою (1.90).

5. *Ділянки корневих годографів на дійсній осі.* Може статися, що якісь гілки бодай частково укладаються на дійсну вісь. Їх можна виявити за такою ознакою: кореневому годографу належать ті точки дійсної осі, праворуч від яких розміщено загальну непарну кількість дійсних нулів та полюсів передавальної функції розімкненої системи.

Тут, як і раніше, вважається, що нулі та полюси розімкненої системи – даність. І в цьому є певне раціональне зерно: визначати нулі та полюси передавальної функції набагато простіше, ніж корені характеристичного полінома замкненої системи. Особливо, коли розімкнена система – ланцюжок послідовно з'єднаних елементів з дробово-раціональними передавальними функціями, тоді корені поліномів-множників є одночасно коренями полінома-добутку.

Перелік правил (властивостей корневих годографів) можна продовжити, але на перший випадок можна обмежитись наведеними.

Розглянемо приклади дослідження елементарних систем методом корневих годографів. Почнемо з системи, схему якої було наведено на рис. 1.49. У ній об'єкт – аперіодична ланка першого порядку зі сталою часу  $T$  – об'єднано у систему з П-регулятором.

Для такої системи

$$W_{\text{роз}}(p) = \frac{k_{\text{об}}k_p}{Tp + 1} = k \frac{1}{p + \frac{1}{T}}, \quad (1.91)$$

де  $k = \frac{k_{\text{об}}k_p}{T}$  (уже зазначалося, що  $k$  – пропорційне  $k_{\text{роз}} = k_{\text{об}}k_p$ ).

Згідно з виразом (1.91) ця система у розімкненому стані нулів не має, а полюс – один:  $p_1 = -1/T$ . Кореневий годограф такої системи показано на рис. 1.64. Про що свідчить такий годограф? Ця система стійка: єдиний корінь характеристичного рівняння розміщується (точніше – «повзає») уздовж дійсної осі, при цьому, що більше  $k$ , то далі він зміщується від уявної осі, й тим більшим буде ступінь (запас) стійкості та швидше перебігатимуть перехідні процеси. І ці перехідні процеси будуть завжди (за будь-яких  $k$ ) аперіодичними. Так справді могло б бути, якби справжня (фізична) система завжди поводи́ла себе так, як написано в її моделі (1.91).

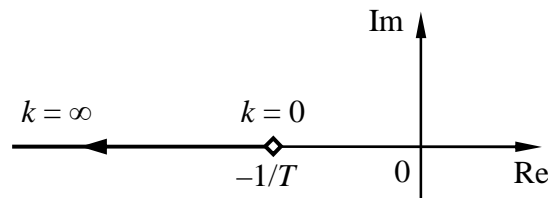


Рис. 1.64. Кореневий годограф системи згідно з моделлю (1.82)

Однак найкраща модель об'єкта – це сам об'єкт, решта моделей – гірші, адже він складніший (тут ми стикаємось із проблемою адекватності моделей). Наше твердження відносно підвищення ступеня стійкості (у разі зростання  $k$ ), а з ним і швидкодії системи, строго кажучи, справедливе лише за умови, що перехідні процеси в системі перебігають повільно, і модель (1.91) зі своїми функціями справляється.

Але з підвищенням швидкодії системи ті інерційності (акумулявальні ємності), впливом яких у разі повільних процесів можна було (і потрібно було) знехтувати, за високих швидкостей можуть заявляти про себе (скажімо, датчик із безінерційної ланки перетворюється в аперіодичну ланку), і модель (1.91) перестане працювати, тобто відповідати реальній системі.

Переходимо до моделі, зображеної на рис. 1.50. Тоді

$$W_{\text{роз}}(p) = \frac{k_{\text{роз}}}{(Tp + 1)(T_{\text{дат}}p + 1)} = k \frac{1}{\left(p + \frac{1}{T}\right)\left(p + \frac{1}{T_{\text{дат}}}\right)}, \quad (1.92)$$

де  $k = \frac{k_{\text{роз}}}{TT_{\text{дат}}}$ .

Розімкнена система (точніше – її передавальна функція) має два полюси, нулів не має. Кореневий годограф такої системи зображено на рис. 1.65.

За малих  $k$  (в околі  $k = 0$ ) маємо один корінь ( $p_1$ ) характеристичного рівняння замкненої системи в околі точки  $-1/T$ , другий ( $p_2$ ) – в околі точки  $-1/T_{дат}$  (далі ліворуч, якщо  $T_{дат} < T$ ). Що ближче корінь характеристичного полінома до уявної осі, то більший його вплив на динаміку системи, і навпаки, що далі від уявної осі корінь, то його вплив слабший.

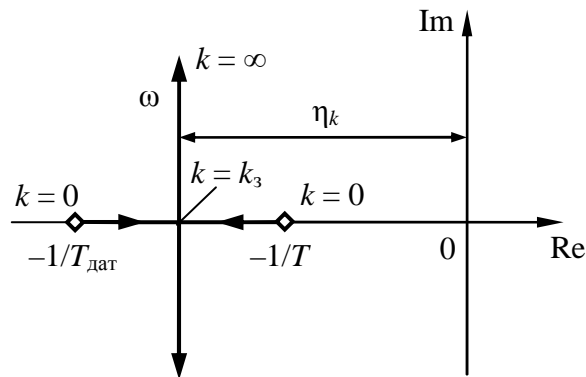


Рис. 1.65. Кореневий годограф системи згідно з моделлю (1.92)

Отже, що далі ліворуч від уявної осі розміщено  $p_2$  (тобто, чим менша інерційність датчика), то менше поведінка даного варіанта системи за малих  $k$  відрізнятиметься від поведінки системи з об'єктом першого порядку. Але в міру зростання  $k$  корені  $p_1$  і  $p_2$  будуть зближуватися доти, доки за деякого  $k = k_3$  не зустрінуться і, «зіткнувшись», розлетяться в протилежні боки, тобто перейдуть у комплексну область.

Перехід з дійсної осі у комплексну область – це перехід у нову якість: система з аперіодичної перетворюється на коливальну, адже корені характеристичного рівняння з дійсних перетворюються на комплексні. У попередньому варіанті такого не спостерігалось. До того ж, якщо раніше збільшення  $k$  тільки збільшувало ступінь стійкості (і підвищувало швидкодію системи), то в цьому випадку швидкодія системи зростатиме тільки до  $k = k_3$ , а після проходження через цю точку (точку зустрічі коренів) ступінь стійкості  $\eta$  стабілізується на рівні

$$\eta_k = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{T} + \frac{1}{T_{дат}} \right)$$

і залишатиметься таким аж до  $k = \infty$ . Частота коливань  $\omega$  зі зростанням  $k$  також зростатиме, а період коливань  $T = 2\pi/\omega$  – відповідно зменшуватиметься. Інакше кажучи, темп коливань зростає, і може настати момент (за достатньо великого  $k$ ), коли знадобиться брати до уваги чергову маленьку



(зі сталою часу  $T_1 < T_{\text{дат}}$ ) інерційність, якою ми раніше (в щойно розглянутому варіанті) обґрунтовано нехтували.

Тоді уточнена модель об'єкта керування набуде вигляду

$$W_{\text{об}}(p) = \frac{k_{\text{об}}}{(Tp + 1)(T_{\text{дат}}p + 1)(T_1p + 1)},$$

а передавальна функція розімкненої системи (якщо регулятор – пропорційний) відповідно буде

$$W_{\text{роз}}(p) = k \frac{1}{\left(p + \frac{1}{T}\right)\left(p + \frac{1}{T_{\text{дат}}}\right)\left(p + \frac{1}{T_1}\right)}, \quad (1.93)$$

де  $k = \frac{k_{\text{роз}}}{TT_{\text{дат}}T_1}$ , а  $k_{\text{роз}} = k_p k_{\text{об}} k_{\text{дат}} k_1$ .

Ескіз кореневого годографа для такого варіанта системи показано на рис. 1.66. Порівняно з попереднім варіантом, тут виникає якісно новий ефект: виявляється, за достатньо великого  $k$  система може не просто коливатись з високою частотою, але наблизитись і навіть перейти через межу стійкості.

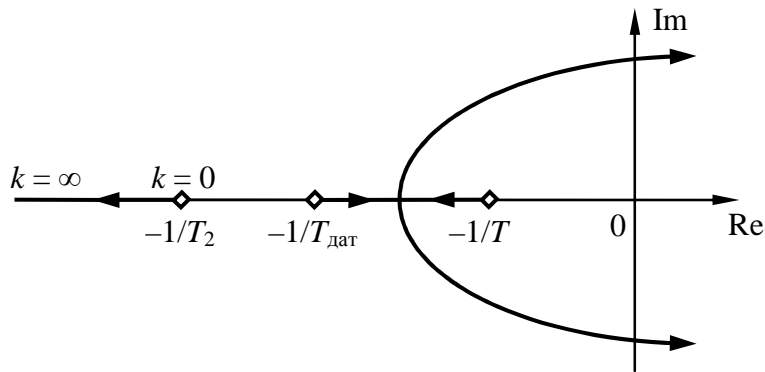


Рис. 1.66. Кореневий годограф системи згідно з моделлю (1.93)

Перейдемо до системи, показаної на рис. 1.51 (з інтегральним регулятором). Для такої системи

$$W_{\text{роз}}(p) = k \frac{1}{\left(p + \frac{1}{T}\right)\left(p + \frac{1}{T_{\text{дат}}}\right)p}, \quad (1.94)$$

де  $k = \frac{k_{\text{роз}}}{TT_{\text{дат}}}$ .

Ця передавальна функція має три полюси, нулів не має. Кореневий годограф системи зображено на рис. 1.67.

Порівняно із системою, кореневий годограф якої зображено на рис. 1.66, вихід на межу стійкості цієї системи станеться набагато раніше – за менших значень  $k_{роз}$  (порівнювати коефіцієнти  $k$  цих систем не можна, оскільки вони різні як за величиною, так і за розмірністю – див. відповідні вирази для визначення  $k$ ).

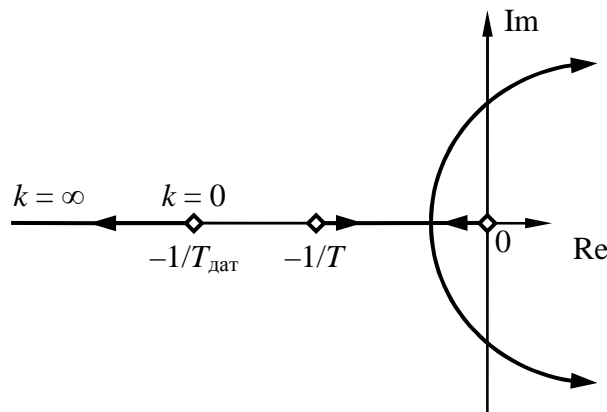


Рис. 1.67. Кореневий годограф системи згідно з моделлю (1.94)

Система, показана на рис. 1.52, матиме передавальну функцію розімкненої системи з трьома полюсами, без нулів:

$$W_{роз}(p) = k \frac{1}{\left(p + \frac{1}{T_{дат}}\right) p^2}, \quad (1.95)$$

де  $k = \frac{k_{роз}}{T_{дат}}$ .

Кореневий годограф системи зображено на рис. 1.70. З нього видно, що така система структурно нестійка.

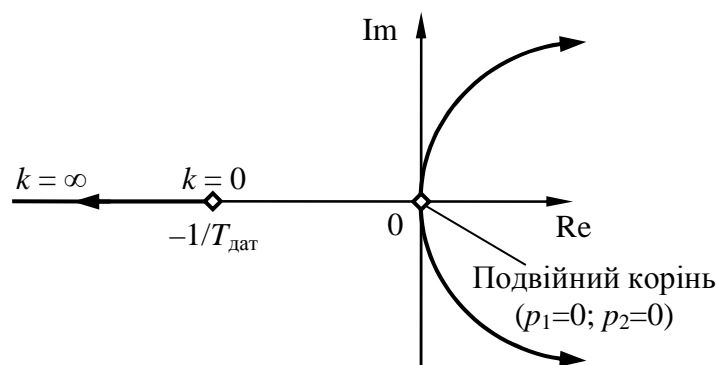


Рис. 1.70. Кореневий годограф системи згідно з моделлю (1.95)

До переваг такого способу аналізу (синтезу) систем керування належать зручність застосування комп'ютерних програм для його виконання. Їх можна знайти, зокрема, в монографії [16] або на кафедрі автоматизації хімічних виробництв інженерно-хімічного факультету НТУУ «КПІ».

### **Контрольні запитання та завдання**

1. Які види моделей використовують для дослідження об'єктів моделювання?
2. На чому ґрунтується створення математичних моделей? У чому їх відмінність від фізичних моделей?
3. Що таке передавальна функція? Чим ще можна задавати математичну модель динаміки об'єкта чи системи керування?
4. Які динамічні елементи належать до елементарних динамічних ланок? Де використовують ці ланки?
5. За якими ознаками класифікують об'єкти керування? Які властивості їм притаманні?
6. Які методи застосовують для отримання статичних і динамічних характеристик об'єктів керування?
7. Чим відрізняються моделі динаміки, отримані аналітично й експериментально?
8. На які види поділяють експериментальні методи отримання математичних моделей?
9. Які алгоритми (закони) регулювання найчастіше використовують у промислових регуляторах? У чому полягають особливості їх застосування?
10. Що таке регулятори прямої дії? Які переваги та вади характерні для них?
11. Які основні підходи застосовують у моделюванні систем керування?
12. Що таке стійкість систем керування? Які критерії використовують для визначення стійкості систем керування?
13. Що розуміють під якістю систем керування? Які показники характеризують якість роботи систем керування в усталеному та перехідному режимах роботи?
14. У чому полягає суть методу кореневих годографів? Для чого його застосовують у системах керування?

## 2. ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ВПЛИВУ НА ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ

Керування фізичними об'єктами здійснюється за допомогою фізичних впливів. У хіміко-технологічних процесах це зміна матеріальних або енергетичних потоків. Механізм, який впливає на об'єкт регулювання за допомогою зміни витрат матеріальних потоків або енергії, що надходять на об'єкт (цим він приводить до норми регульований параметр, який відхилився від заданого значення) називається *регулювальним органом* (РО). Регулювальний орган являє собою змінний гідравлічний опір, який регулює витрату технологічного середовища зміною прохідного перерізу трубопроводу. Однак регулювальний вплив, сформований регулятором (його вихідний сигнал – електричний або пневматичний) сам по собі не може змістити робочий елемент РО, щоб забезпечити необхідну зміну речовини або енергії.

Для посилення та відпрацювання керувального впливу, що приводить до зміни регульованого параметра об'єкта керування, призначені *виконавчі механізми* (ВМ). Режим роботи ВМ визначається режимом роботи систем керування: у системах, призначених для відпрацювання керувальних впливів, які мають випадковий характер і надходять безперервно, виконавчі механізми працюють у короткочасних, повторно-короткочасних і тривалих режимах.

За видом використовуваної енергії ВМ систем керування можна поділити на електричні, пневматичні, гідравлічні та комбіновані.

Будучи кінцевим і найбільш потужним каскадом системи автоматичного керування, ВМ суттєво впливають на статичні та динамічні властивості системи в цілому. Як елемент системи автоматичного керування ВМ має забезпечити необхідну амплітуду вихідних переміщень зі зміною вхідного сигналу в робочому діапазоні частот.

У будь-якому режимі роботи статичні та динамічні характеристики ВМ мають задовольняти умови стійкості та вимоги якості керування. До технічних вимог, які висувають до ВМ систем керування, належать: високий рівень потужності, що забезпечує належні значення переміщення, швидкості та прискорення регульовального органа; висока швидкодія; великий коефіцієнт підсилення за потужністю; лінійність статичних характеристик; плавність регулювання швидкості переміщення в широких діапазонах; малі маса та габарити, низька вартість; зручність в експлуатації, висока надійність.

### 2.1. ПНЕВМАТИЧНІ ВИКОНАВЧІ МЕХАНІЗМИ

Пневматичні виконавчі механізми мають досить значне поширення в хімічній промисловості завдяки простоті конструкції, надійності у роботі та можливості застосування у пожежо- і вибухонебезпечних умовах виробництва. Пересувне зусилля у цих механізмах утворюється за рахунок дії стисненого повітря на чутливий елемент (мембрана, поршень або

пневмодвигун, сиффон). Мембранні та поршневі пневматичні механізми забезпечують зворотно-поступальний рух штока, який може бути перетворений у поворотний за допомогою додаткового механічного пристрою, а пневмодвигуни – тільки поворотний рух вихідного вала. Наявність робочої пружини у мембранних і поршневих ВМ дає змогу утворювати пересувне зусилля в одному напрямку за рахунок стисненого повітря.

У протилежному напрямку пересувне зусилля утворюється за рахунок зусилля, що розвивається пружиною, і значна частина зусилля від дії тиску повітря витрачається на стискання пружини. У безпружинних ВМ пересувне зусилля у протилежних напрямках утворюється дією тиску з обох боків чутливого елемента – тиск з одного боку підвищується, а з другого – зменшується, або ж навпаки. Отже, ці механізми належать до пристроїв двосторонньої дії.

### 2.1.1. Мембранно-пружинні виконавчі механізми

Найчастіше такі ВМ використовують у системах керування як приводи регулювальних поворотних заслінок, одно- та двосідельних шлангових і діафрагмових регулювальних клапанів. Схема будови мембранно-пружинного виконавчого механізму (МВМ) прямої дії наведено на рис. 2.1.

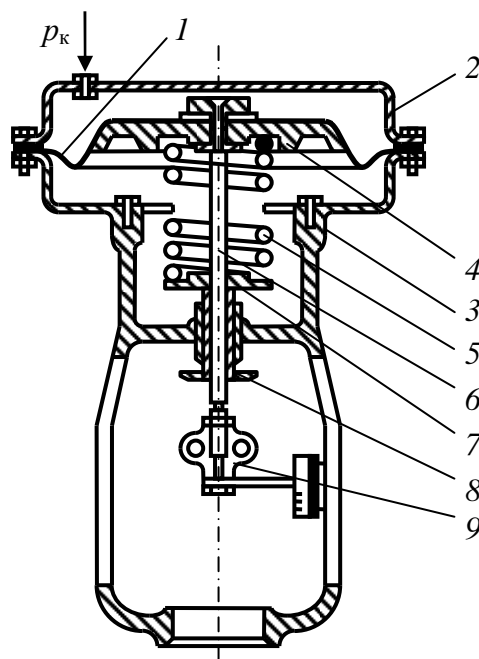


Рис. 2.1. Мембранно-пружинний виконавчий механізм прямої дії:  
 1 – мембрана; 2 – кришка; 3 – корпус; 4 – опорний диск; 5 – пружина; 6 – шток;  
 7 – опорне кільце; 8 – регулювальна втулка; 9 – з'єднувальна гайка

Основними елементами МВМ прямої дії (ППХ), побудованого за принципом компенсації зусиль, є мембранна камера, кронштейн з пружиною і рухома частина. Мембранна камера утворена кришкою 2, верхньою частиною

корпуса 3 і затиснутою між ними мембраною 1. Верхня кришка і мембрана утворюють робочу порожнину. Рухома частина складається з опорного диска (жорсткий центр) 4, до якого прикріплено мембрану 1 і шток 6 зі з'єднувальною гайкою 9. Ця гайка призначена для з'єднання штока ВМ зі штоком РО. Пружина 5 одним кінцем упирається в опорний диск 4, а другим – через опorne кільце 7 – у регулювальну втулку 8, яка служить для зміни початкового натягування пружини 5 і напрямлення руху штока 6.

Якщо в робочій порожнині тиску повітря немає, пружина 5 притискує мембрану 1 до виступів верхньої кришки 2. Шток 6 займає крайнє верхнє положення. У разі підвищення тиску в робочій порожнині вище від атмосферного на мембрану 1 та її жорсткий центр діє сила  $N$ , яка дорівнює добутку надмірного тиску (командного пневмосигналу)  $p_k$  на ефективну площу мембрани  $F$  (цю силу називають переставним зусиллям ВМ). Ця сила стискатиме пружину 5 та зміщуватиме рухому систему ВМ униз доти, доки пружна протидія пружини стане рівною силі  $N$ . Зі зменшенням пневмосигналу  $p_k$  в камері над мембраною сила стиснення пружини перевищить силу, утворену тиском  $p_k$  на мембрані (переставне зусилля), пружина почне розтискатися, і шток 6 знову зміщуватиметься вверх.

У мембранних пружинних механізмах зворотної дії (ОПХ) з підвищенням тиску повітря  $p_k$  у робочій порожнині (тиск підводиться під мембрану – про таку схему кажуть «повітря відкриває») кінець штока 6 втягується, збільшуючи ступінь відкривання РО.

Мембрани ВМ зазвичай виготовляють із гуми з парусиновим прошарком. Іноді застосовують мембрани з неопрену або неопрену з парусиновою чи капроною прокладкою. Такі мембрани тонші за гумові та більш міцні.

Мембранні виконавчі механізми мають порівняно низьку чутливість, значний люфт і гістерезис, зумовлені в'ялістю мембран, тому їх застосовують у системах регулювання з порівняно невисокими вимогами до якості регулювання.

Для підвищення чутливості, швидкодії, збільшення переставного зусилля та зменшення гістерезису (не має перевищувати 1,5–2 % від повного ходу РО) в мембранних ВМ використовуються підсилювачі потужності зі зворотним зв'язком за положенням РО (*позиціонери*), особливо необхідні для роботи клапана в умовах в'язких середовищ, високого тиску регульованого середовища, значних відстаней між регулятором і ВМ. Схему підключення позиціонера, побудованого за принципом переміщення, показано на рис. 2.2.

Малопотужний сигнал регулятора  $P_k$  (0,02...0,1 МПа) виводить з рівноваги кінематичну схему. При цьому потужний сигнал  $P_{живл}$  (0,25 МПа) подається на мембранний виконавчий механізм, який переміщує шток і з'єднаний з ним РО. Переміщення штока приводить кінематичну систему

до стану рівноваги. Кінематичний елемент К реалізує зворотний зв'язок за положенням РО, що дає змогу забезпечувати змінний хід РО, попри сталі значення тиску (0,25 МПа), подаваного в мембранну камеру (змінним є вихідний пневмосигнал  $p_k$  регулятора).

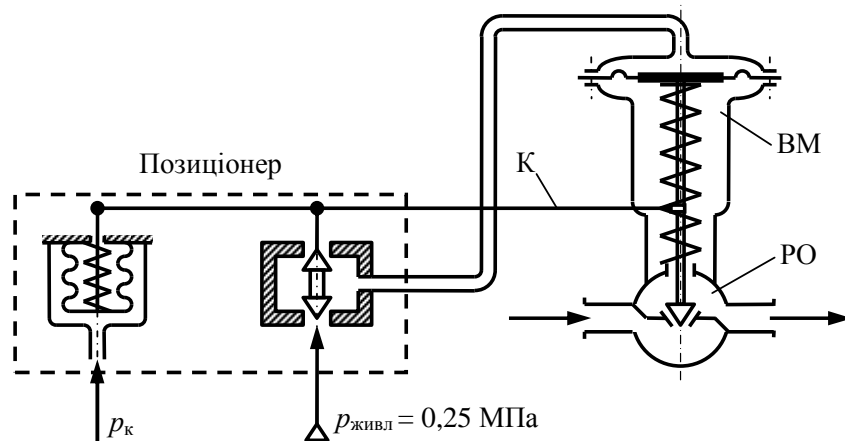


Рис. 2.2. Спрощена схема роботи позиціонера

Мембранні ММ часто комплектуються боковими чи верхніми ручними дублерами, призначеними для керування РО у разі аварійного відключення командного пневмосигналу. При цьому бокові дублери забезпечують керування РО ручним способом не тільки після припинення надходження пневмосигналу, але і за відмови самого мембранного ММ (пошкодження пружини, розгерметизація мембранної камери тощо).

### 2.1.2. Пневмопоршневі приводи

Порівняно з мембранними, пневмопоршневі приводи мають більше переміщення робочого вихідного органа і формують більше переставне зусилля на вихідному елементі. Слідкувальний поршневий привід ПСП (рис. 2.3) складається з циліндра 3, всередині якого розміщено поршень 4 з порожнистим силовим штоком 5.

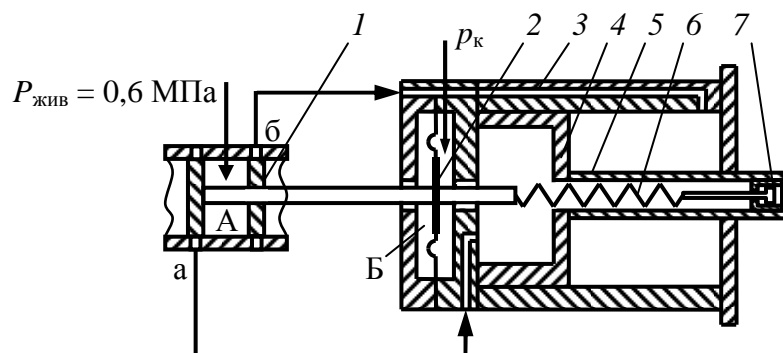


Рис. 2.3. Пневмопоршневий привід:  
 1 – золотник; 2 – мембрана; 3 – циліндр; 4 – поршень; 5 – порожнистий шток;  
 6 – пружина; 7 – натяжний механізм

У порожнині штока розміщено пружину 6, яку використовують для створення жорсткого зворотного зв'язку в механізмі слідкувальної системи приводу. Пружина з'єднана зі штоком за допомогою натяжного механізму 7, який забезпечує плавне регулювання натягу пружини і сполучений шарнірно з жорстким центром вимірювальної мембрани 2. Другим боком жорсткий центр мембрани 2 сполучається з відсічним золотником 1.

Робота пневмоприводу полягає в тому, що сигнал  $p_k$  від регулятора (0,02...0,1 МПа) надходить у камеру Б вимірювальної мембрани і деформує її, зміщуючи жорсткий центр ліворуч. При цьому переміщується й золотниковий пристрій 1, відкриваючи канал «а» чи «б». Стиснене повітря з камери А тиском 0,6 МПа через вказані канали надходить у ліву або праву порожнину поршня і переміщує його, змінюючи натяг пружини зворотного зв'язку 6, пов'язаної з вимірювальною мембраною 2. Вимірювальна мембрана, деформуючись, переміщує золотник 1 і відсікає камеру А від вікон – шток 5 виконавчого механізму зупиняється.

## 2.2. ЕЛЕКТРИЧНІ ВИКОНАВЧІ МЕХАНІЗМИ

До складу електричних виконавчих механізмів зазвичай входять електродвигун, редуктор, кінцеві та шляхові вимикачі, датчики положення, гальмувальний пристрій, ручний привід. Електродвигун з редуктором здійснюють перетворення електричної енергії у механічну, достатню для подолання опору середовища регулювальним органом. Кінцеві вимикачі використовуються для вимикання пускового пристрою у разі досягнення РО крайніх положень, тобто виконують захисні функції, а шляхові вимикачі – для обмеження діапазону переміщення вихідного елемента РО в автоматичному режимі.

Датчики положення (зазвичай реостатні або індуктивні) формують сигнал, пропорційний куту повороту вихідного вала ВМ. Цей сигнал надходить до індикатора положення на пульті оператора, а також може використовуватись у системі керування як сигнал зворотного зв'язку за положенням РО чи для забезпечення потрібного алгоритму регулювання.

Гальмувальні пристрої встановлюються у ВМ для зменшення вибігу вихідного вала (штока) під час зупинки електродвигуна (після припинення дії керувальних сигналів). Ручний привід передбачений у ВМ для забезпечення можливості переміщення РО у разі виходу з ладу пускового пристрою або електродвигуна.

Виконавчі електродвигуни – найбільш інерційні елементи автоматичних систем, їх потужність коливається від часток вата до кількох кіловатів. Проектування силової частини АСК, яка має виконавчий електродвигун і механічну зубчасту передачу, складається з обґрунтованого обрання типу двигуна, попереднього обрання параметрів механічної передачі (редуктора), визначення потужності двигуна й уточнення параметрів редуктора.



Останніми роками дедалі більшого поширення в АСК набувають безредукторні приводи, виконані на основі дугостаторних або лінійних асинхронних двигунів.

### 2.2.1. Виконавчі двигуни постійного струму

Ці ВМ найбільш повно задовольняють вимоги до виконавчих механізмів систем керування. Вони використовуються в приводах потужністю від десятих часток кіловата до кількох кіловатів. За способом збудження двигуни поділяють на виконавчі двигуни з електромагнітним збудженням і зі збудженням від постійних магнітів. Двигуни з електромагнітним збудженням виконуються з незалежним, послідовним і змішаним збудженням. Керування двигунами постійного струму може бути безперервним та імпульсним.

Електродвигуном постійного струму з незалежним збудженням можна керувати як з боку якоря, так і з боку обмотки збудження (різні способи керування впливають на механічну характеристику двигуна). У разі керування електродвигуном з боку якоря (рис. 2.4) обмотка збудження живиться незмінною напругою постійного струму  $U_3$  і створює потік збудження  $\Phi_3$ . До ярірного кола електродвигуна підводиться керувальна напруга  $U_k$  постійного струму.

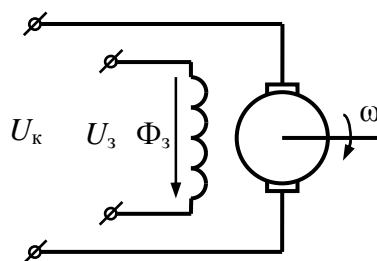


Рис. 2.4. Електрична схема двигуна постійного струму

У разі керування електродвигуном з боку обмотки збудження коло якоря живиться від мережі стабілізованою напругою постійного струму, а керувальна напруга подається на обмотку збудження. За цього способу керування потрібна менша потужність сигналу керування, що дає змогу використати як кінцеві підсилювачі електронні, магнітні, напівпровідникові й інші малопотужні підсилювачі. До вад керування електродвигуном з боку обмотки збудження належать малий діапазон зміни швидкості, нелінійність статичних характеристик, збільшення порядку рівняння руху електродвигуна.

У системах автоматичного керування значного поширення набув спосіб керування двигуном з боку якоря, оскільки він дає змогу отримати широкий діапазон регулювання швидкості, плавність регулювання, відносно лінійність статичних характеристик, більшу швидкодію.

За імпульсного керування швидкістю двигуна зміни швидкості обертання якоря досягають не за рахунок зміни напруги керування, що безперервно підводиться до двигуна, а зміною часу, впродовж якого до двигуна підводиться номінальна напруга. За такого способу керування на електродвигун

надходить послідовність імпульсів постійної амплітуди  $U_k$  і різної тривалості  $t_i$ . Послідовність імпульсів може бути однополярною та різнополярною. Робота двигуна за імпульсного керування складається з чергувальних періодів розгону та гальмування, причому періоди розгону мають бути малими порівняно з електромеханічною сталою часу, тоді швидкість обертання якоря  $\omega$  не встигає до кінця періоду досягти сталого значення.

Поширені також безконтактні схеми керування швидкістю двигуна на напівпровідникових елементах методом широтно-імпульсної модуляції (рис. 2.5). Напівпровідниковий тріод у колі якоря двигуна працює в режимі перемикачів й керується прямокутними імпульсами  $U_k$ . Коли тріод відкритий, напруга  $U_k$  прикладена до якоря, і відбувається розгін двигуна, коли тріод закритий – гальмування. Для захисту тріода від перенапруг за рахунок ЕРС самоіндукції обмотки якоря під час запирання тріода якір шунтують діодом Д.

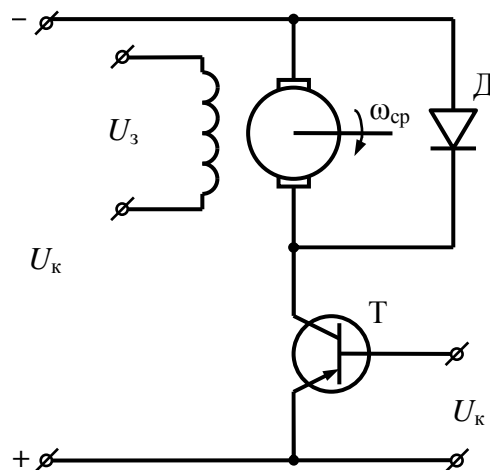


Рис. 2.5. Схема імпульсного керування електродвигуном

Механічні характеристики виконавчих двигунів постійного струму за імпульсного методу керування лінійні, причому їх нахил зменшується в міру зменшення відносної тривалості імпульса  $\alpha = t_i / T$ , де  $T$  – період проходження імпульсів. Регульовальні характеристики нелінійні.

Слід зазначити, що апаратура імпульсного керування відрізняється схемною та конструкційною простотою, має малі габарити й масу, високу надійність.

### 2.2.2. Виконавчі двигуни змінного струму

У системах автоматичного керування значного поширення як ВМ набули двофазні асинхронні двигуни з короткозамкненим або тонкостінним порожнистим ротором.

Двофазні асинхронні двигуни мають на статорі обмотку керування й обмотку збудження, магнітні осі яких зміщені в просторі на  $90^\circ$  (рис. 2.6).

У разі подавання на ці обмотки змінних напруг постійної амплітуди й зміщених по фазі на  $90^\circ$ , у магнітній системі двигуна виникає обертове магнітне поле, що захоплює за собою ротор.

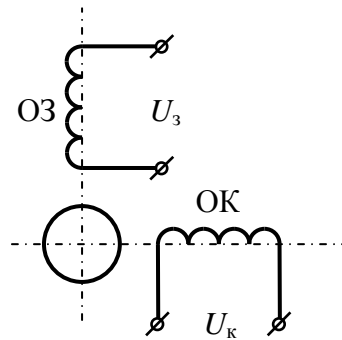


Рис. 2.6. Електрична схема двофазного асинхронного двигуна

Ротор починає обертатись у той самий бік, що й магнітне поле, але з меншою кутовою швидкістю. Різниця між кутовими швидкостями магнітного поля й ротора двигуна характеризується ковзанням

$$S = (\omega_1 - \omega_d) / \omega_1,$$

де  $\omega_1$  – кутова швидкість магнітного поля;  $\omega_d$  – кутова швидкість ротора.

Швидкість обертання ротора електродвигуна за незмінної напруги на обмотці збудження  $U_3$  можна регулювати зміною амплітуди або фази керувальної напруги  $U_k$ . Основні способи керування швидкістю обертання ротора – амплітудний, фазовий і амплітудно-фазовий.

За амплітудно-фазового керування (рис. 2.7) швидкість обертання ротора двигуна регулюється зміною напруги  $U_k$ . Для зміщення фаз між напругами та струмами в коло обмотки збудження вмикають ємність  $C$ .

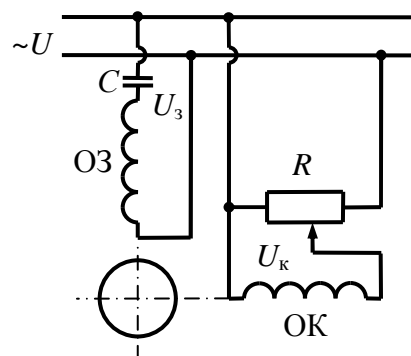


Рис. 2.7. Амплітудно-фазовий спосіб керування двофазними двигунами

Зі зміною напруги  $U_k$  або моменту навантаження на валу двигуна за постійного значення  $U_k$  відбувається зміна як величини, так і фази напруги  $U_3$ . Це пояснюється тим, що напруга збудження дорівнює геометричній різниці напруги мережі  $U_{\sim}$  і напруги на конденсаторі  $U_c$ . Напруга  $U_c$  у разі

зміни  $U_k$  або швидкості обертання ротора за рахунок коливань моменту на валу двигуна змінюється внаслідок зміни струму збудження, тому напруга  $U_3$  змінюється за величиною та фазою.

Порівняно з двигунами постійного струму двофазні асинхронні двигуни мають низку переваг: за однакової потужності, не маючи щіток, створюють менший момент тертя; в них менші напруга зрушення та потужність керування, оскільки обмотку збудження живлять безпосередньо від мережі; простіша конструкція. Попри це двигуни постійного струму мають вищий коефіцієнт корисної дії та меншу масу.

Для кожного з розглянутих способів керування використовують трипровідну лінію зв'язку. Один з проводів загальний, а два інших потрібні для подавання керувального сигналу у напрямку «менше» та «більше». Параметри сигналів зв'язку регулювальних блоків, пускових пристроїв і ВМ стандартизовані, що сприяє можливості застосування того самого типу ВМ з різними системами регулювальних блоків.

### **2.2.3. Промислові типи електричних виконавчих механізмів**

Однооборотні електричні виконавчі механізми призначені для переміщення РО у системах автоматичного регулювання відповідно до командних сигналів керувальних пристроїв. Застосовуються найчастіше у системах двопозиційного регулювання для переміщення вихідного органа з одного крайнього положення в друге, тобто для роботи за принципом «відкрити – закрити». У цих ВМ вихідний орган здійснює обертальний рух у межах 0,25 чи 0,63 оберту.

Як електропривід у механізмах типу МЕО застосовують самогальмувальний асинхронний електродвигун  $I$  з фазозрушувальним конденсатором  $C$  (рис. 2.8), у деяких модифікаціях МЕО застосовують синхронні електродвигуни.

Виконавчі механізми МЕО оснащені також редуктором  $2$ , що знижує кількість обертів, гальмовим пристроєм, кінцевими вимикачами КВ, що обмежують обертання вихідного органа, та датчиком положення  $3$ , вихід якого, попри індикацію та сигналізацію положення вихідного елемента РО, може використовуватись у системі керування як сигнал зворотного зв'язку за положенням РО.

Цифри у шифрі модифікації відповідно позначають: номінальне значення навантаження на вихідному валу (Н·м); номінальне значення часу повного ходу вихідного вала (с); номінальне значення ходу вихідного вала (оберт). Наприклад, ВМ з шифром МЕО 6,3/10-0,25 має номінальний обертальний момент на вихідному валу 6,3 Н·м (виробляються також модифікації МЕО з номінальним значенням обертального моменту 16, 40, 100, 250, 630, 1600, 4000 та 10000 Н·м), номінальне значення часу повного вибігу вихідного вала 10 с (у різних модифікаціях також 25, 63 та 160 с), номінальне значення

ходу вала 0,25 оберта. Режим роботи таких ВМ повторно-короткочасний реверсивний з кількістю вмикань до 320 на годину і тривалістю до 25 %.

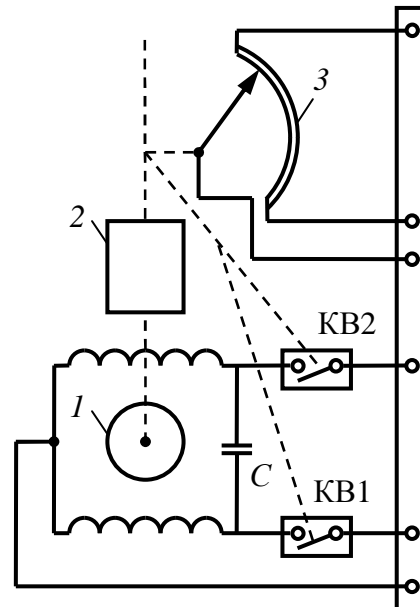


Рис. 2.8. Електрична схема електродвигунного ВМ:  
 1 – електродвигун; 2 – редуктор; 3 – реостат датчика положення РО;  
 KB1, KB2 – кінцеві вимикачі

Багатооборотні електричні виконавчі механізми призначені для дистанційного, місцевого й автоматичного керування трубопровідною запірною арматурою (засувками, вентилями, заслінками тощо) і являють собою електромеханічний привід, який складається з електродвигуна, понижувального механічного редуктора та низки допоміжних пристроїв. Незважаючи на конструктивні та схемні відмінності, усі ці ВМ дозволяють здійснювати: дистанційний або автоматичний пуск електроприводу за допомогою пускових кнопок «відкрити» та «закрити» чи контактів блокувальних реле; зупинку електроприводу у будь-якому проміжному положенні РО за допомогою кнопки «стоп» або відповідних контактів блокувальних реле; автоматичну зупинку електроприводу у разі надмірного зростання обертового моменту, що можливо за відмови шляхових вимикачів або стопоріння рухомих частин приводу чи робочого органа; дистанційну світлову сигналізацію крайніх положень РО; місцеве визначення положення РО у певний момент за допомогою стрілкового вказівника, дистанційне показання будь-якого проміжного положення РО за допомогою покажчика положення, датчик якого може бути встановлений на коробці шляхових вимикачів; електричне блокування певного електроприводу з іншими механізмами й агрегатами; ручне керування електроприводом за допомогою маховика на випадок тимчасового припинення подачі електроенергії.

Слід зазначити, що найчастіше багатооборотні ВМ є пристроями позиційної дії, і лише багатооборотні ВМ типу МЕМ, які забезпечені датчиком

зворотного зв'язку за положенням вихідного вала, можуть бути застосовані в автоматичних системах для реалізації П-, ПІ- та ПІД-законів регулювання.

Багатооборотні ВМ різних типів (ЕПВ-10, Б099 тощо) та модифікацій відрізняються між собою величиною максимального обертового моменту, конструкцією редуктора, способом обмеження припустимого моменту на приводному валу, габаритними та приєднувальними розмірами, деякими іншими конструктивними особливостями.

Вибір електроприводу здійснюється залежно від потрібного обертового моменту, частоти обертання вихідного вала, кількості обертів вихідного вала, потрібного для закриття (відкриття) арматури, приєднувальних розмірів та умов експлуатації.

Живлення електродвигунів забезпечується змінною трифазною напругою 380 В, частотою 50 Гц. Довготривалий режим роботи двигунів припускається у разі навантаження не більше 50 % від максимального.

Прямохідні електричні виконавчі механізми призначені для прямолінійного переміщення з постійною швидкістю регулювальних органів у системах автоматичного та дистанційного керування. У прямохідних механізмах типу ЕСПА та МЕР, як і в МЕР, встановлено датчики положення робочого органа, які використовують для зворотного зв'язку, та мікрореле, а також маховик для ручного керування регулювальним органом. Обертовий механізм, утворений швидкісним і силовим редукторами, працює у межах повної ходи від 0,25 до 4 обертів вихідного вала. При цьому прямохідний вихідний орган являє собою кулькову гвинтову пару, яка перетворює обертовий рух вихідного вала швидкісного редуктора у поступальний рух штока.

Живлення механізмів МЕР здійснюється трифазним змінним струмом напругою 220/380 В чи 240/415 В частотою 50 Гц, а також 220/380 В частотою 60 Гц. Живлення механізмів ЕСПА здійснюється від однофазної мережі змінного струму напругою 220 В з частотою 50 Гц.

Цифри у шифрі ВМ типу МЕР мають значення, аналогічні до МЕР та МЕР, з тією різницею, що перша показує номінальне зусилля на штоку (Н), а не момент. Для різних модифікацій цих ВМ номінальне зусилля може становити 800, 1250, 1600, 6300, 16000, 20000 та 25000 Н, номінальний час повного вибігу штока – 25, 50, 60, 63, 100, 125, 200, 240 та 340 с, а повний хід штока – 20, 30, 40, 50, 60, 100, 120 та 370 мм.

### **2.3. ОСНОВНІ ВИДИ РЕГУЛЮВАЛЬНИХ ОРГАНІВ**

Найбільшого поширення в АСК набули дросельні РО. Серед них слід розрізняти заслінкові з поворотними дросельними заслінками (рис. 2.9, а), клапанні односідельні (з поступальним переміщенням запірно-регулювального елемента уздовж осі сідла – рис. 2.9, б) і двосідельні (з поступальним переміщенням запірно-регулювального елемента уздовж осі двох сідел – рис. 2.9, в); клапанні кульові (з поступальним переміщенням запірно-

регулювального елемента уздовж осі сідла – рис. 2.9, *з*); діафрагмові з поступальним переміщенням центра діафрагми відносно сідла, виконаного у вигляді перегородки в корпусі (рис. 2.10, *д*); шлангові зі змінним прохідним перерізом пружного елемента у вигляді відрізка шланга (рис. 2.9, *е*).

*Заслінкові РО* широко застосовуються у системах автоматичного регулювання компресорних і вакуумних машин та установок, у системах кондиціонування, вентиляції, у криогенній техніці. Великий економічний ефект дає використання заслінкових пристроїв замість клапанних за діаметрів трубопроводу понад 150 мм. Це пояснюється значно меншими втратами тисків у трубопроводах через малі коефіцієнти гідравлічного опору дросельних заслінкових пристроїв. У разі використання заслінкових пристроїв на діаметри умовного проходу 500 мм і більше через наявність великих незрівноважених обертальних моментів на валу заслінок необхідно застосовувати приводи великої потужності. Найчастіше використовують заслінкові РО з діаметром умовного проходу 50...1000 мм і призначених для тиску 0,64...2,5 МПа та перепаду тиску 0,01...1,6 МПа.

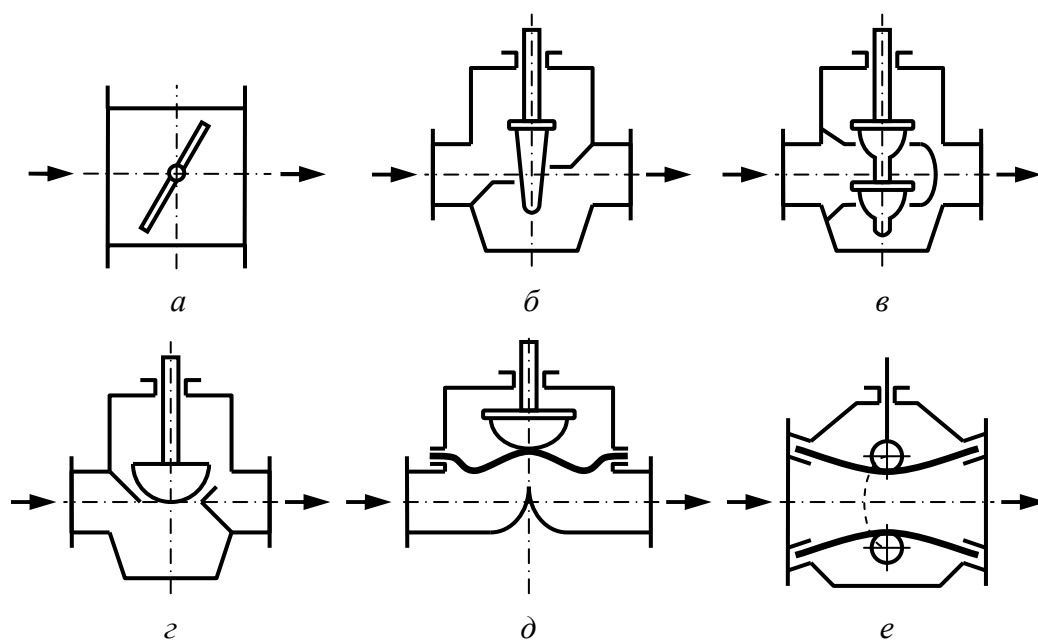


Рис. 2.9. Регулювальні органи:

*a* – заслінковий; *б, в* – клапанні; *г* – кульовий; *д* – діафрагмовий; *е* – шланговий

*Клапанні РО* – найбільш поширений вид дросельних пристроїв. Регулювальні клапани відрізняються за видом і кількістю опірних поверхонь (одно- і двосідельні), за конструкцією затворів (тарілчасті, пробкові, поршневі) і корпусів. Односідельні РО можуть бути прохідними і кутовими. У прохідних РО напрямок потоку середовища на вході і виході не змінюється, а у кутових змінюється при виході на  $90^\circ$  по відношенню до напрямку на вході. Двосідельні клапани виготовляють нормального (типу НО) та

зворотного (НЗ) виконання. Вада двосідельного РО – порівняно велике значення негерметичності затвора. Крім того, за великих перепадів тиску і звичайних конфігурацій дроселювальних поверхонь рух середовища створює великі зусилля на клапан через динамічну незрівноваженість затвора. Односідельні РО застосовують у тих випадках, коли неможливе застосування розвантажених двосідельних РО, у разі потреби в забезпеченні герметичності закриття проходу, за малих розмірів проходів (до 15 мм), а також за великих проходів, якщо середовище має велику в'язкість чи містить тверді частинки.

Для регулювання потоків з великим перепадом тиску на клапані ( $\Delta p > 1,5$  МПа), у разі стрімкого збільшення об'єму регульованого середовища при виході зі щілини між затвором і сідлом різко підвищується, а також у разі регулювання в'язких потоків і середовищ, що містять тверді частинки, слід застосовувати кутові односідельні клапани. Це пов'язано з тим, що вони мають менше «мертвих» просторів для осідання та кристалізації твердих частинок.

Тарілчасті затвори мають плоску чи конічну форму запиральної та дроселювальної поверхонь. Затвори з плоскою формою найчастіше застосовують як запірні органи або у разі двопозиційного регулюванні, а з конічною формою – у разі регулювання великих витрат. Конструктивна характеристика тарілчастих клапанів має лінійну залежність. Вада цих затворів – швидка зношувальність поверхні.

Пробкові затвори являють собою дроселювальну поверхню, яка має форму поверхні оберту параболи, а запиральну поверхню виконано у вигляді конічних кромек. Пробкові затвори використовують у важких умовах експлуатації у разі регулювання витрати в'язких рідин і кристалоутворювальних середовищ. Конструктивні характеристики клапанів з пробковим затвором можуть бути будь-якими залежно від профілю дроселювальної поверхні. Для запобігання швидкому зношенню на ній роблять наплавки твердими сплавами, що забезпечує широке застосування пробкових затворів у двосідельних РО.

Поршневі затвори мають дроселювальну поверхню, виконану у вигляді шліців чи різьбових отворів. У першому випадку (шліци) площа прохідного перерізу між затвором і сідлом утворюється сумарною площиною окремих шліців. Застосовують цей тип затворів для регулювання нев'язких і несхильних до кристалізації рідин. У затворах з різьбовими отворами кількість отворів підбирають так, щоб з підняттям затвора підвищувалась і сумарна площа прохідного перерізу. У клапанах, призначених для роботи в умовах кавітації, поршневі затвори мають велику кількість різьбових отворів на боковій поверхні поршня. Конструктивні і пропускні характеристики можуть бути легко змінені за допомогою зміни профілю шліців.

*Триходові клапанні РО* зазвичай застосовують для безперервного і двопозиційного регулювання. За безперервного регулювання викорис-



товують клапани, що розділяють потік чи змішують два потоки. Для двопозиційного регулювання ці клапани застосовують у тому разі, коли потік почергово направляєтся то в одному, то в другому напрямках або коли обидва потоки почергово переміщуються в одному напрямку.

*Діафрагмові РО* застосовують для регулювання витрат агресивних рідин і газів. Особливість діафрагмових РО полягає у застосуванні як ущільнення та рухомого дросельовального елемента гнучкої мембрани з гуми, поліетилену чи фторпласту. Внутрішню поверхню пристрою футерують кислотостійкими матеріалами (емаль, гума, вініпласт, фторпласт тощо). Переваги діафрагмових РО – застосування дешевих антикорозійних матеріалів і відсутність сальникової конструкції. Витратна характеристика діафрагмових РО ідентична шланговим.

*Шлангові РО* мають пружні елементи для зміни витрати середовища. Пружний елемент – шланг (рис. 5.9, *e*) виготовляють з якісної гуми на основі тканинного армування, що забезпечує високу міцність. Під час роботи РО два вали, між якими протягнуто шланг, рухаються у протилежних напрямках – наближуються чи розходяться у площині, перпендикулярній осі проходу корпусу, змінюючи пропускну здатність РО. Шлангові клапани застосовують як запірні та регульовальні органи для потоків середовищ, що містять тверді й абразивні частинки. У конструкції шлангових клапанів передбачено можливість зміни зношених шлангів на нові. Найбільш інтенсивне підвищення пропускну здатності відбувається у разі посування штока від 0 (з положення закриття РО) до 0,25 його максимального значення. На цій ділянці пропускну (витратна) характеристика РО майже лінійна.

Кранові перекирвальні органи містять перекирвальний елемент (затвор), який має форму тіла обертання й обертається навколо власної осі, ковзаючи своєю запиральною поверхнею по запиральній поверхні сідла. Найчастіше використовують конічні та сферичні затвори. Останні мають суттєві переваги порівняно з першими. В них виключено можливість заклинення. Затвор здійснює обертальний рух, а розміри і маса завдяки сферичній (кульовій) формі запираючої поверхні незначні.

Засувні перекирвальні органи містять затвор, що постійно ковзає за запираючими поверхнями по запираючих поверхнях сідел, які доволі швидко зношуються. Переміщення затвора вимагає великих установочних зусиль. Робоча характеристика засувних органів майже лінійна.

Обираючи тип, конструкцію та розміри РО і ВМ для їх роботи у конкретних умовах, необхідно враховувати: характер регульованого середовища (газ, рідина, пара), його склад і робочі параметри (тиск, температура, густина, в'язкість); максимальну та мінімальну витрати середовища, що проходить через РО; крайнє положення, яке має зайняти РО (відкрите, закрите) у разі аварійного відключення сигналу, поданого до приводу ВМ, чи виходу з ладу самого приводу; необхідну швидкодію спрацьовування запираючих РО. Конструкція РО має бути розрахована на максимальний тиск і мінімальну чи мак-

симальну робочу температуру середовища; матеріали основних деталей РО мають бути хімічно стійкими до агресивних дій з боку середовища. Вибір діаметра умовного проходу і характеристик РО та ВМ проводять розрахунковим способом за відповідними алгоритмами.

Регулювання витрати «важких» рідких середовищ (висока в'язкість, схильність до кристалоутворення, наявність твердих домішок) висуває особливі вимоги до застосовуваних РО. Так, до запірних органів для регулювання витрати рідких середовищ із твердими вкрапленнями висувають такі вимоги:

1) відсутність пристроїв, які зменшують площу поперечного перерізу технологічного елемента (трубопроводу, дозувального органа тощо), через який рухається середовище;

2) здійснення в процесі регулювання витрати очищення запірного органа від часток твердої фази.

Зазначеним вимогам відповідає обертовий запірний орган (рис. 2.10) для регулювання витрати рідких середовищ із твердими вкрапленнями з об'єктів з вільним зливанням або з агрегатів, у яких середовище не перебуває під тиском.

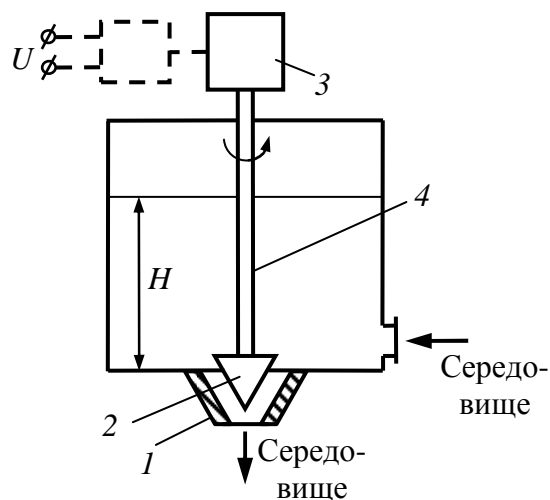


Рис. 2.10. Будова обертового запірного органа для регулювання витрати рідин із твердими вкрапленнями:

1 – конічна втулка; 2 – конічна пробка; 3 – двигун; 4 – вихідний вал двигуна

Запірний орган складається зі зрізаної конічної втулки 1, в якій установлена із заданим зазором конічна пробка 2. Пробка обертається двигуном 3, на валу 4 якого вона закріплена. Під час обертання пробки утворюються відцентрові сили, спрямовані проти руху рідини під дією статичного напору  $H$  в резервуарі.

Експериментально встановлено, що у разі збільшення кількості обертів витрата рідини через конічну втулку зменшується і за певної кількості (різної для різних зазорів) стає рівним нулю.

У цьому разі в процесі регулювання витрати не відбувається засмічення втулки частками твердої фази. Обертання конічної втулки може здійснюватися електричним або пневматичним двигунами.

## 2.4. ПРИСТРОЇ ДИСТАНЦІЙНОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ УСТАТКУВАННЯМ І ПРИВОДАМИ

*Пускові пристрої* (на практиці побутує також назва *пускова апаратура*) призначенні для керування ВМ і забезпечують необхідне підсилення потужності керувальних (командних) сигналів від регулювальних блоків чи блоків керування у ручному режимі. Пускові пристрої можуть бути контактні і безконтактні. Кожен тип пускового пристрою розрахований на роботу у комплекті з певним типом ВМ. Вхідні кола пускових пристроїв дають змогу використовувати найчастіше два види керувальних сигналів: активний сигнал керування у вигляді постійного чи пульсівного струму напругою 24 В та пасивний сигнал керування у вигляді замикання відповідних вхідних затискачів за допомогою безконтактних чи контактних ключів. Активний сигнал використовується зазвичай у разі керування пусковим пристроєм від релейно-імпульсних регулювальних блоків, а пасивний сигнал застосовується переважно у разі ручного дистанційного керування за допомогою відповідних кнопок чи ключів. Енергія, необхідна для спрацьовування пускового пристрою, в останньому випадку надходить від джерела живлення самого пускового пристрою.

Основним комутаційним апаратом, який здійснює підключення електродвигуна до мережі живлення, є контактор. Електромагнітний контактор являє собою потужне електромагнітне реле, контактний вузол якого здатний замикати та розмикати силові кола зі струмами в десятки і сотні амперів з напругою у сотні вольтів. За таких електричних навантажень слід використовувати спеціальні заходи щодо гасіння дуги, яка виникає під час перемикачів, тому порівняно зі звичайними електромагнітними реле електромагнітні контактори мають дугогасильні пристрої та більш потужні електромагнітні і контактні вузли. Крім силових (потужних) контактів конструкцією контакторів передбачені також блокувальні контакти, що використовуються в керуванні для потреб автоматики. Розрізняють контактори постійного та змінного струмів.

Для автоматичного пуску, зупинки та реверсування електродвигунів застосовують магнітні пускачі. Вони являють собою комплектні електричні апарати, що включають електромагнітні контактори, кнопки керування, реле захисту та блокування.

Контактори та магнітні пускачі використовують і для керування роботою інших потужних споживачів електроенергії: освітлювальних та нагрівальних установок, перетворювального та технологічного електроустаткування.

Останнім часом для керування електродвигунами дедалі ширшого застосування набувають тиристорні перетворювачі. Так, зокрема, виробляють тиристорні реверсивні підсилювачі для керування однофазними та трифазними електродвигунами, а також тиристорні підсилювачі потужності змінного струму для керування електронагрівачами.

### 2.4.1. Контакттори

Принцип дії контакторів такий, як і принцип дії електромагнітних реле, багато в чому подібна й їх будова. Головна відмінність полягає в тому, що контакти контакторів комутують великі струми. Тому їх виготовляють більш масивними, вони потребують великих перестановних зусиль, між контактами у разі їх розриву виникає дуга, яку необхідно загасити.

Основними вузлами контактора є електромагнітний механізм, головний (силовий) контактний вузол, дугогасильна система, блокувальний контактний вузол. Електромагнітний механізм здійснює замикання і розмикання контактів. У разі подачі напруги на втягувальну котушку електромагніта якір притягується до осердя, а механічно зв'язані з ним рухомі контакти замикають силове коло і здійснюють необхідні перемикання в колі керування.

Магнітні системи контакторів залежно від характеру руху якоря та конструкції виготовляють поворотними чи прямохідними. Для запобігання залипанню якоря використовуються немагнітні прокладки. Для замикання силових контактів потрібні значно більші зусилля, ніж ті, які здатні розвинути реле, тому електромагнітний механізм контактора виконується більш потужним і масивним. У разі спрацьовування контактора відбувається досить значний удар якоря по осердю. Частково його приймає на себе немагнітна прокладка; oprіч цього, магнітну систему амортизують додатковою пружиною, яка також зменшує вібрацію контактів. Для забезпечення тривалого режиму роботи на поверхню мідних контактів можуть напаяватися металокерамічні або срібні пластинки.

Втягувальна котушка зазвичай забезпечує увімкнення й утримання якоря в притягнутому положенні. Іноді використовують дві котушки: потужну, яка вмикає, і менш потужну утримувальну. Такий контактор у увімкненому стані споживає менше електроенергії, оскільки потужна котушка перебуває під струмом тільки короткий час, розмикання контактів відбувається за рахунок пружини, коли знята напруга. Втягувальна котушка має забезпечувати надійне спрацьовування контактора у разі зниження напруги до  $0,85U_{\text{ном}}$ . Під час нагрівання котушка має витримувати підвищення напруги до  $1,05U_{\text{ном}}$ .

### 2.4.2. Магнітні пускачі

Магнітний (електромагнітний) пускач – це модифікований контактор, що є низьковольтним електромагнітним (електромеханічним) комбінованим пристроєм, призначеним для запуску одно- та трифазних асинхронних двигунів. На відміну від контактора, магнітний пускач комплектується додатковим устаткуванням: тепловим реле, додатковою контактною групою або автоматом для пуску електродвигуна. Він забезпечує керування пуском і розгоном електродвигуна до номінальної швидкості, його безперервною роботою, а також відключення живлення і захисту електродвигуна та підключених кіл від робочих перевантажень.

Схему вмикання трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором наведено на рис. 2.11. Для пуску електродвигуна *M* натискається кнопка *SB2* («ПУСК»). Через котушку контактора *KM* проходить струм, електромагніт контактора спрацьовує і замикаються всі його контакти, позначені на схемі тими самими літерами *KM1*. Силкові контакти *KM1-2...KM1-4* підводять трифазну напругу до обмотки електродвигуна *M1*. Паралельно до кнопки *SB2* приєднано блокувальні контакти *KM1-1*. Оскільки вони замкнулися, то після відпускання кнопки *SB2* котушка контактора буде заживлена через ці контакти, а потужні контакти контактора й далі підводитимуть напругу живлення до обмотки електродвигуна.

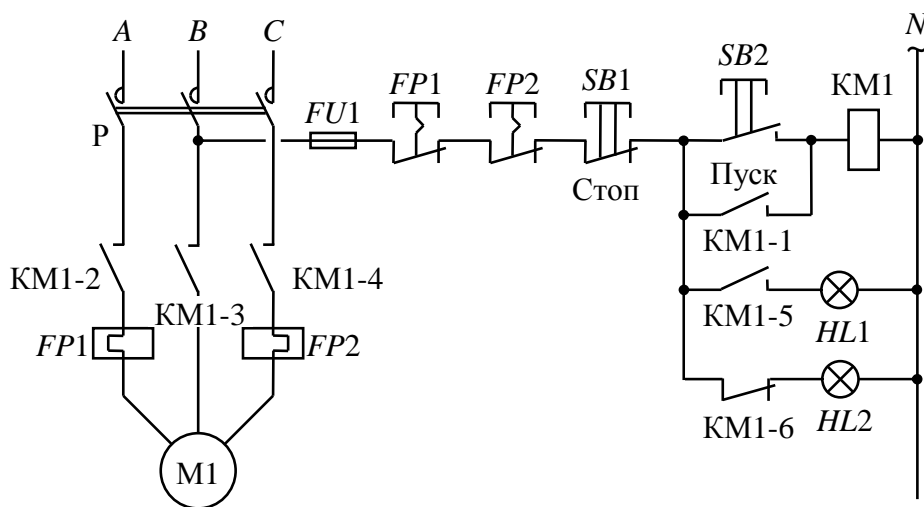


Рис. 2.11. Схема вмикання трифазного асинхронного електродвигуна з магнітним пускачем (без зміни напрямку обертання)

Для зупинки електродвигуна служить кнопка *SB2* («СТОП»), натисканням якої розривається коло живлення електромагніта контактора *KM1*. Сигнальні лампи *HL1* (зелене світло) і *HL2* (червоне світло) відображають стан увімкнено / вимкнено електродвигуна.

Для захисту електродвигуна від перегрівання служать теплові реле *FP1* і *FP2*, чутливі елементи яких підключено до двох фаз електродвигуна, а розмикальні контакти, позначені тими самими літерами, увімкнені в коло живлення електромагніта контактора *KM1*. Для захисту самої схеми керування служать плавкі запобіжник *FU1*. На схемі показано також рубильник *P*, що зазвичай перебуває у постійно замкненому положенні. Його розмикають лише за потреби проведення ремонтних робіт. Подібна схема типова, вона застосовується у всіх випадках, які не потребують зміни напрямку обертання (реверсу) електродвигуна та інтенсивного (примусового) гальмування.

Реверсивну схему увімкнення трифазного асинхронного двигуна показано на рис. 2.12. Щоб реверсувати трифазний асинхронний двигун, необхідно змінити порядок чергування фаз на обмотці статора. Наприклад, якщо для прямого обертання фази підключалися в послідовності *ABC*, то для зворотного обертання необхідна послідовність *ACB*. З огляду на це до

складу реверсивного магнітного пускача входять два контактори: КМВ для обертання вперед і КМН для обертання назад.

Крім того, реверсивний магнітний пускач має три кнопки керування та автоматичні вимикачі (теплові реле). У деяких випадках у комплект магнітного пускача входять також пакетний перемикач і плавкі запобіжники.

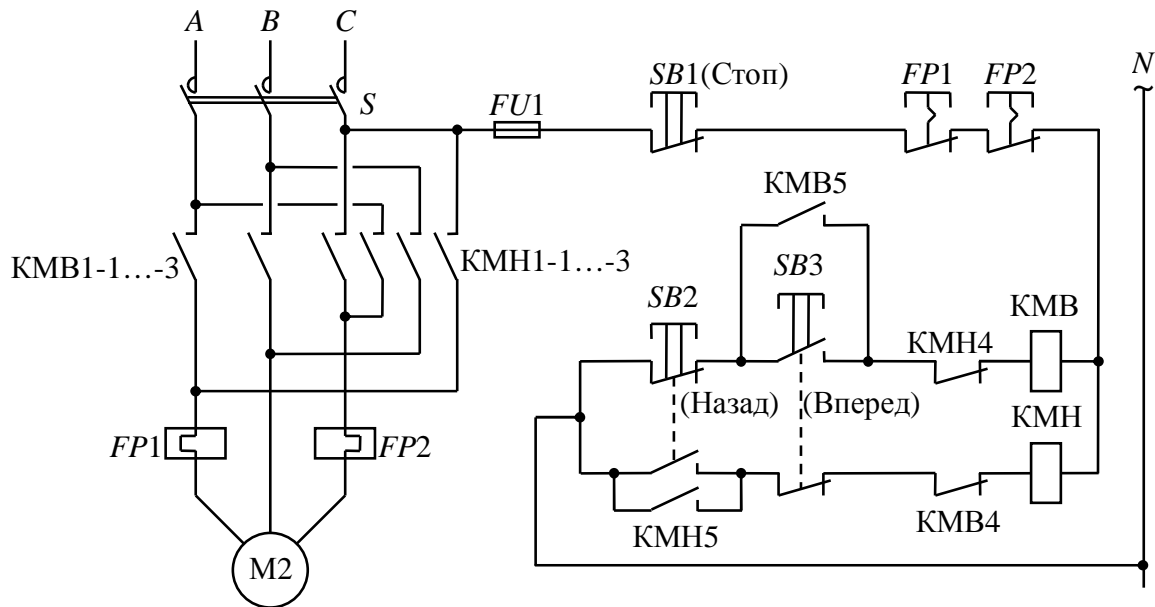


Рис. 2.12. Схема вмикання / вимикання трифазного асинхронного електродвигуна з реверсивним магнітним пускачем

Для ввімкнення електродвигуна  $M2$  в прямому напрямку необхідно натиснути кнопку  $SB3$  («ВПЕРЕД»). При цьому спрацьовує контактор КМВ і своїми силовими контактами КМВ1-1...КМВ1-3 підключає обмотки електродвигуна до трифазної мережі живлення. Одночасно блокувальні контакти КМВ4 розривають коло живлення електромагніта контактора КМН, чим виключається можливість одночасного увімкнення обох контакторів.

Для вмикання електродвигуна в зворотному напрямку необхідно натиснути кнопку  $SB2$  («НАЗАД»). При цьому спрацьовує контактор КМН і своїми силовими контактами КМН1-1...КМН1-3 підключає обмотки електродвигуна до трифазної мережі, але в іншій послідовності з'єднання фаз, ніж це було після вмикання контактора КМВ:  $ACB$ . У разі спрацьовування контактора КМН його блокувальні контакти КМН4 розривають коло живлення електромагніта контактора КМВ. Одночасне увімкнення контакторів спричинило б коротке замикання двох лінійних проводів трифазної мережі між собою. Блокувальні (розмикальні) контакти КМВ4 та КМН4 контакторів якраз і потрібні для того, щоб запобігти такій аварії (у разі одночасного натискання обох кнопок  $SB2$  і  $SB3$  спрацює тільки той контактор, кнопка якого бодай на мить була натиснута раніше).

Для реверса електродвигуна треба попередньо натиснути кнопку  $SB1$  («СТОП»). У цьому разі блокувальні контакти КМВ4 та КМН4 підготов-

люють коло керування до нового увімкнення. Для надійної роботи необхідно, щоб силові контакти контактора розімкнулися раніше, ніж відбудеться замикання блокувальних контактів у колі іншого контактора. Для блокування кнопок *SB2* і *SB3* використовують замикальні блокувальні контакти *КМВ5* та *КМН5* відповідного контактора, підключені паралельно кнопці.

Потрібно виключити одночасне спрацьовування обох контакторів, для чого використовують подвійне чи навіть потрійне блокування. З цією метою в схемі рис. 2.12 застосовують здвоєні кнопки *SB2* і *SB3*. Наприклад, кнопка *SB3* під час натискання замикає свої контакти в колі контактора *КМВ* і одночасно розриває свої контакти в колі контактора *КМН*. Аналогічно працює здвоєна кнопка *SB2*. Крім того, реверсивні магнітні пускачі можуть мати механічне блокування з перекидним важелем, який перешкоджає одночасному спрацьовуванню електромагнітів обох контакторів. Контакти теплових реле *FP1* і *FP2*, увімкнені в дві фази обмотки електродвигуна, відключають коло живлення електромагнітів обох контакторів у разі тривалого протікання великого струму, щоб не допустити перегрівання контактора. Для захисту схеми керування служить плавкий запобіжник *FU1*.

Магнітні пускачі і контактори вибирають за номінальним струмом електродвигуна з урахуванням умов експлуатації. Для сигналізації кінцевих положень запірних та регулювальних пристроїв (засувки, заслінок, клапанів тощо) використовують кінцеві вимикачі. Для індикації будь-якого проміжного положення запірних пристроїв застосовують індукційні та реостатні перетворювачі (дистанційні вказівники положення), у яких виконавчими пристроями замість сигнальних ламп є стрілочні прилади.

Дистанційні вказівники положення *РО* часто використовують також і для створення сигналів зворотного зв'язку в системах керування роботою електроприводу. На рис. 2.13 наведено приклад застосування реостатного дистанційного вказівника положення регулювального органа електропривода типу *МЕМ* (*МЕО*, *МЕОК*, *ЕСПА* тощо) у системі регулювання витрати.

У контурі автоматичного регулювання, що забезпечує заданий рівень насичення, який називається нормально-кисневим водно-хімічним режимом, *МЕМ* використовується як виконавчий механізм на лінії подачі повітря, а реостатний дистанційний вказівник положення регулювального органа електроприводу формує сигнал зворотного зв'язку для регулятора. Рівень насичення вимірюється аналізатором кисню *АК-500*. Схему автоматизації процесу насичення живильної води парового котла киснем наведено у дод. 2.

### **2.4.3. Тиристорні підсилювачі потужності**

Керування тиристорним перетворювачем здійснюється зміною кута керування тиристорами через дискретні проміжки часу. Ці властивості тиристорних перетворювачів створюють сприятливі умови для застосування цифрових регуляторів у системах керування. Своєю чергою, високий технологічний рівень виробництва сучасних електронних схем з великим ступенем

інтеграції, висока надійність і порівняно низька вартість їх у розрахунку на одиницю оброблюваної інформації стимулюють розробки мікропроцесорних систем для керування тиристорними перетворювачами.

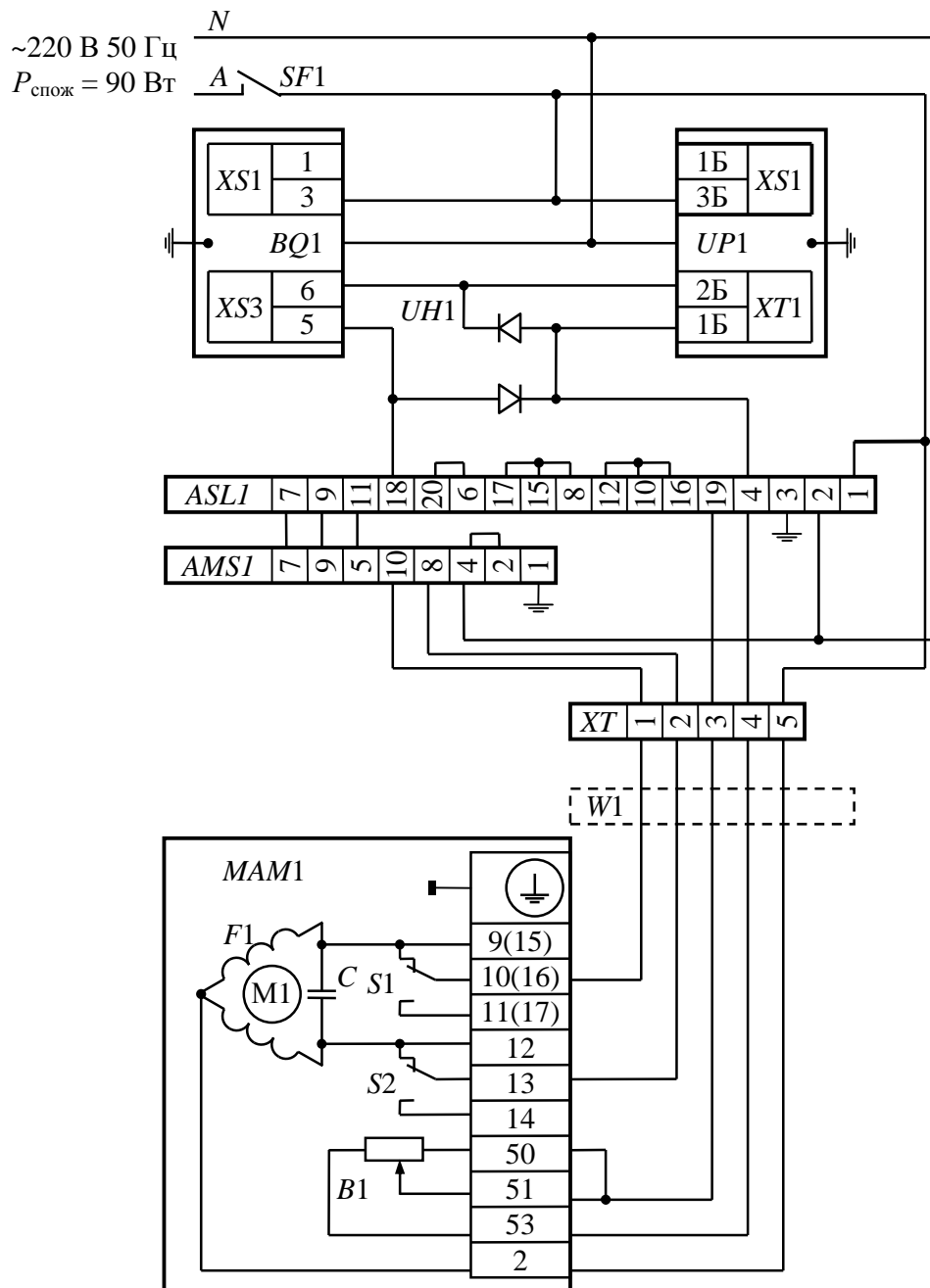


Рис. 2.13. Схема з'єднань системи автоматичного регулювання нормально-кисневого водно-хімічного режиму живильної води парового котла:

*UH1, UH2* – пристрій захисний; *SF1* – вимикач; *XS, XT* – колодки клемні;  
*W1* – кабелі ліній зв'язку; *MAM1* – схема керування приводом запірно-регулювального клапана; *UP1* – прилад самописний; *BQ1* – аналізатор кисню; *ASL1* – регулятор;  
*AMS1* – підсилювач тиристорний трипозиційний; *M1* – електропривод

Тиристорні підсилювачі широко застосовують для керування потужністю електричного навантаження в одно- і трифазних колах змінного струму в



схемах автоматичного регулювання та керування різними технологічними процесами. Схемотехнічно вони являють собою симістори або пари потужних тиристорів з блоком керування й елементами захисту. Блок керування перетворює вхідні дискретні, імпульсні або аналогові сигнали та забезпечує гальванічну розв'язку вхідних низьковольтних кіл і потужного вихідного каскаду.

Джерелами дискретних, імпульсних або аналогових сигналів керування для тиристорних підсилювачів можуть бути як ручні задавачі та блоки керування, так і різноманітні контролери чи регулятори. Підсилювачі часто використовують у системах керування електротермічними процесами для регулювання потужності нагрівачів, печей і термостатів. У таких процесах потужність навантаження регулюється за рахунок широтно-імпульсної (ШИМ) або фазоімпульсної (ФІМ) модуляцій.

Підсилювачі потужності також використовують як безконтактні пристрої керування одно- та трифазними синхронними й асинхронними електродвигунами, електромагнітними пусковими пристроями, а також електронагрівачами. У цьому разі вони виконують такі функції: підсилюють дискретні й імпульсні сигнали; забезпечують пуск і зупинку електродвигуна; виконують захист електродвигуна від миттєвого реверсу; сигналізують про перевантаження.

Найчастіше тиристорні підсилювачі застосовуються для керування приводами електричних виконавчих механізмів постійної швидкості (наприклад, МЕО, МЕОФ, КЗР), використовуваних практично для будь-якої запірної та запірно-регулювальної арматури неповноповоротного принципу дії: кульових і пробкових кранів, клапанів, шиберів, дискових затворів, заслінок. Вони також використовуються як безконтактні пристрої керування електронагрівачами.

Для збільшення номінальної вихідної потужності тиристорних підсилювачів можуть використовуватися зовнішні симістори або увімкнені зустрічно-паралельно тиристори.

### **Контрольні запитання та завдання**

1. На які види поділяють пневматичні виконавчі механізми? Які особливості їх застосування?
2. У чому полягає призначення позиціонера? Які переваги його використання?
3. Які елементи входять до складу електричних виконавчих механізмів? У чому полягає їх функціональне призначення?
4. Які типи електричних виконавчих механізмів належать до промислових? Які особливості їх застосування?
5. Які види регулювальних органів найчастіше використовують у системах керування хіміко-технологічними процесами?
6. Які пускові пристрої використовують для дистанційного керування технологічним устаткуванням і приводами? У чому полягають особливості їх будови та застосування?
7. Чим відрізняються магнітні пускачі від контакторів? Яке призначення додаткового устаткування, яким комплектуються магнітні пускачі?
8. Для керування якими виконавчими механізмами можуть бути застосовані тиристорні підсилювачі?

## 3. АВТОМАТИЧНІ Й АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

### 3.1. ГОЛОВНІ ПРИНЦИПИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Головними принципами автоматичного керування є принцип керування за збуренням (принцип Понселе–Чиколєва) та принцип керування за відхиленням (Ползунова–Уатта).

*Принцип керування за збуренням*, запропонований французьким інженером і математиком Ж.-В. Понселе, іноді називають *компенсаційним*. Вперше його використав у регуляторах дугових ламп освітлення російський електротехнік В. М. Чиколєв у другій половині XIX ст.

Структурну схему системи автоматичного керування (САК), що реалізує цей принцип, наведено на рис. 3.1. З усіх збурень  $\lambda_i$  ( $1 \leq i \leq n$ ), що діють на систему керування, обирається те, яке має найбільший вплив на керований параметр, наприклад  $\lambda_1$ .

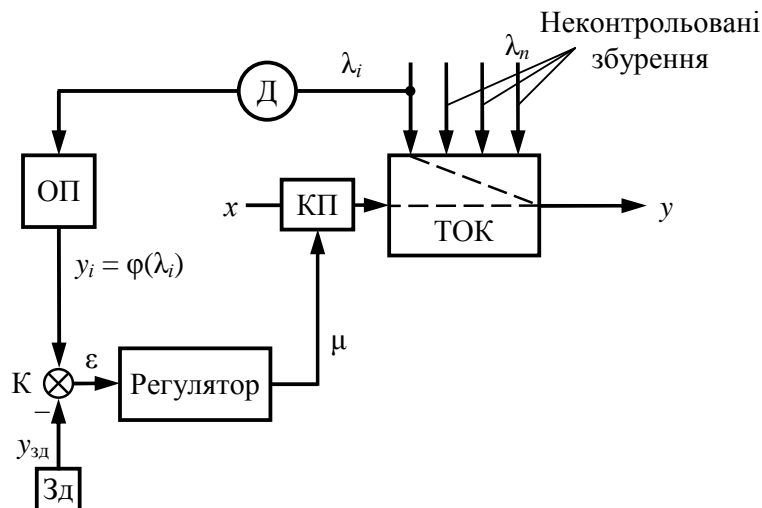


Рис. 3.1. Структурна схема системи керування за збуренням:  
Д – датчик; КП – керувальний пристрій; ОП – обчислювальний пристрій;  
К – компаратор; Зд – задавач

Із встановленої залежності  $y_i = f(\lambda_i)$  (застосування принципу керування за збуренням обмежене об'єктами, характеристики яких відомі) за вимірним значенням  $\lambda_i$  ОП розраховує поточні значення керованого параметра  $y_i$ , унаслідок порівняння якого в компараторі (пристрій порівняння на базі суматора – зазвичай входить до складу регулятора) К із виробленим задавачем Зд (зовнішнім або вмонтованим у регулятор) заданим значенням керованого параметра  $u_{зд}$  визначається величина відхилення  $\varepsilon_i = u_{зд} - y_i$ . За отриманою величиною відхилення  $\varepsilon_i$  регулятор за відповідним алгоритмом (законом)  $f$  формує керувальний вплив  $\mu_i$ , реалізація якого (подача на ОК за допомогою

керувального пристрою КП, що складається з виконавчого механізму та регулювального органа) спрямована на забезпечення інваріантності керованого параметра у до коливань контрольованого збурення  $\lambda_i$ .

Як видно зі схеми (рис. 3.1), в системі керування, яка реалізує принцип Понселе–Чиколєва, є два канали впливу збурення на керований параметр: канал збурення  $\lambda_i \rightarrow y$  об'єкта керування, що є природним каналом впливу збурення  $\lambda_i$ , та канал керування  $x \rightarrow y$ , який є штучно утвореним компенсаційним каналом.

Розглянемо приклад технічної реалізації цього принципу. Нехай тиск  $P$  у герметизованому відсіку потрібно підтримувати незмінним (рис. 3.2).

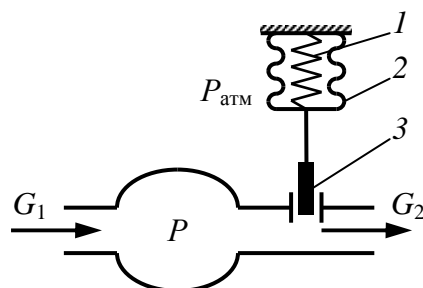


Рис. 3.2. Система стабілізації тиску:  
1 – пружина; 2 – сильфон; 3 – заслінка

Це можливо у разі забезпечення однаковості витрат повітря  $G_1$  (на вході) і  $G_2$  (на виході). Збуреннями виступають можливі зміни витрат. Незмінність витрати (подачі) повітря на вході  $G_1$  забезпечується стабільною роботою компресора, тоді як витрата повітря на виході з відсіку  $G_2$  залежить від коливань атмосферного тиску  $P_{\text{атм}}$ :  $G_2 = k\sqrt{(P - P_{\text{атм}})}$ .

За правильного підбору параметрів сильфона 1 і пружини 2 зміна витрати  $G_2$ , зумовлена коливаннями атмосферного тиску  $P_{\text{атм}}$ , буде компенсуватися відповідним переміщенням заслінки 3, забезпечуючи відновлення рівноваги  $G_1 = G_2$ , а отже, стабілізації тиску  $P$  у герметизованому відсіку.

Розглянутій системі керування (такі САК називають *розімкненими*) за збуренням притаманна низка серйозних вад, які значно знижують її ефективність:

а) інваріантність керованого параметра у відносно можливих збурень забезпечується тільки по відношенню до контрольованого (зазвичай одного) збурювального впливу. Наявність інших збурень (неконтрольованих – у розглянутій системі стабілізації тиску це, наприклад, може бути зміна пружних властивостей сильфона та пружини, спричинена коливаннями температури зовнішнього середовища) неминуче призведе до того, що реальне значення керованого параметра значно відрізнятиметься від заданого його значення  $y_{\text{зд}}$ , тобто мети керування (постійно підтримувати  $y_i(t) = y_{\text{зд}}(t)$ ) не буде досягнуто;

б) інваріантність відповідно до п. а) забезпечується тільки за умови жорсткої відповідності параметрів об'єкта керування та регулятора їх роз-

рахунковим значенням, зокрема у залежності  $y = \varphi(\lambda_1)$ , функція  $\varphi$  має бути незмінною; зміна цих характеристик спричинить виникнення неконтрольованого відхилення керованого параметра;

в) система керування працює у розімкненому режимі (без зворотного зв'язку за якістю керування).

Втім, такі системи керування не позбавлені й переваг:

а) у них не виникає проблем стійкості, як у розімкнених системах;

б) у цих системах можливе досягнення інваріантності керованого параметра відносно контрольованого збурення, тобто досягнення повної компенсації дії збурення на керований параметр.

Можна вдатися до спроби ліквідації всіх основних збурень – наприклад, використанням додаткових регуляторів, які застабілізують вхідні параметри процесу. Та з огляду на велику кількість можливих збурень (до того ж, не всі з них можна застабілізувати), технічно реалізувати таке рішення навряд чи можливо.

У замкнених системах керування впливи  $\mu$  формуються залежно від відхилення  $\varepsilon$  поточного значення керованого параметра  $y$  від заданого  $y_{зд}$ , й усі збурення компенсуються одним керувальним впливом. Такий принцип керування називається *принципом Ползунова–Уатта* або *керуванням за відхиленням*. Російський винахідник І. І. Ползунов 1765 року використав для підтримання сталого рівня води в котлі парової машини розроблений ним автоматичний регулятор рівня прямої дії, в якому було вперше реалізовано цей принцип (див. п. 1.3.2 Кн. 1). Англійський винахідник Дж. Уатт 1784 року для стабілізації швидкості обертання вала парової машини вперше використав відцентровий регулятор, який також діяв відповідно до принципу керування за відхиленням.

Спрощену структурну схему системи керування, побудованої на принципі керування за відхиленням, показано на рис. 3.3.

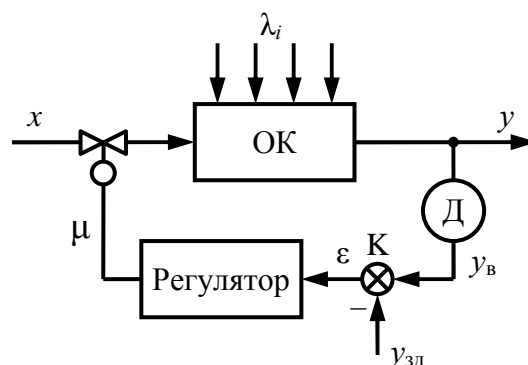


Рис. 3.3. Структурна схема системи керування за відхиленням

На компараторі К виміряне датчиком Д значення керованого параметра  $y_v$  порівнюється з його заданим значенням  $y_{зд}$  і визначається відхилення

$\varepsilon = y_v - y_{зд}$ . Регулятор згідно з реалізованим у ньому алгоритмом (законом) формує керувальний вплив  $\mu = f(\varepsilon)$ , спрямований на те, щоб за допомогою зміни керувального параметра  $x$  звести величину відхилення до нуля.

У разі керування за відхиленням жоден зі збурювальних впливів не вимірюється – у цьому немає потреби, оскільки система ліквідує відхилення незалежно від його причин, тобто компенсує інтегральну дію на керовану величину всіх збурень, які зумовлюють відхилення поточних значень у від заданих  $y_{зд}$ .

Розглянемо реалізацію цього принципу керування на прикладі теплообмінника, керованим параметром якого є температури  $t_{вих}$  технологічної рідини на його виході (рис. 3.4), а керувальним впливом – витрата теплоносія, наприклад, пари  $Q_{п}$ . До збурень  $\lambda_i$  зокрема можна віднести зміну коефіцієнта теплопередачі (іржа чи накип на поверхні теплообміну), порушення теплоізоляції.

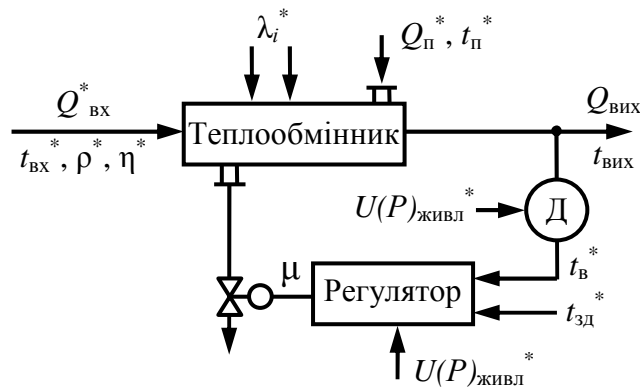


Рис. 3.4. Схема керування роботою теплообмінника

Зміна кожного із позначених зірочкою «\*» параметрів – зокрема витрати  $Q_{вх}$ , температури  $t_{вх}$ , фізико-хімічних властивостей (густина  $\rho$ , в'язкості  $\eta$ ) технологічної рідини на вході в теплообмінник, витрати  $Q_{п}$  та температури  $t_{п}$  теплоносія (пари), завдання регулятору  $t_{зд}$ , параметрів енергії живлення (електричного  $U_{живл}$  або пневматичного  $P_{живл}$ ), точності вимірювання поточного значення  $t_v$  керованого параметра  $t_{вих}$ , збурень  $\lambda_i$  тощо – буде вносити збурення у систему керування, спричинюючи відхилення керованого параметра від його заданого значення. І незалежно від того, що саме спричинить виникнення відхилення  $\varepsilon$ , регулятор зміною подачі пари  $Q_{п}$  намагатиметься звести його до нуля.

Системи з принципом керування за відхиленням мають такі переваги:

1) менше, порівняно з розімкненими САК, відхилення керованої величини від потрібного значення незалежно від того, якими чинниками (зовнішніми збуреннями, зміною параметрів елементів САК чи завдання регулятора) воно спричинено;

2) менш чутливі до змін параметрів елементів системи, порівняно з розімкненими системами.

До вад таких САК можна віднести:

1) неможливість у більшості практичних випадків, зокрема в простих одноконтурних системах керування, досягнення абсолютної інваріантності – це зумовлено тим, що в разі керування за відхиленням керувальний вплив отримується внаслідок перетворення сигналу відхилення, а не самого чинника, що спричинив його виникнення, наприклад, якогось збурення (тобто завдяки компенсації наслідку, а не самої причини);

2) у цих САК, як узагалі в замкнених системах, виникає потреба у вирішенні проблеми стійкості.

Системи автоматичного керування побудовані на принципі керування за відхиленням, мають складніші методи розрахунку, дослідження та налагодження. В цілому такий принцип керування використовується за потреби забезпечення високої точності як у статичних, так і в динамічних режимах.

У комбінованих системах використовують принципи формування керувальних впливів і розімкнених, і замкнених систем. В основу комбінованої системи покладено замкнену систему, а для поліпшення якості керування частина збурень компенсується додатковими регуляторами, тобто в комбінованих системах принцип керування за відхиленням реалізується за допомогою головного зворотного зв'язку, а принцип керування за збуренням – за допомогою компенсаційних зв'язків (рис. 3.5).

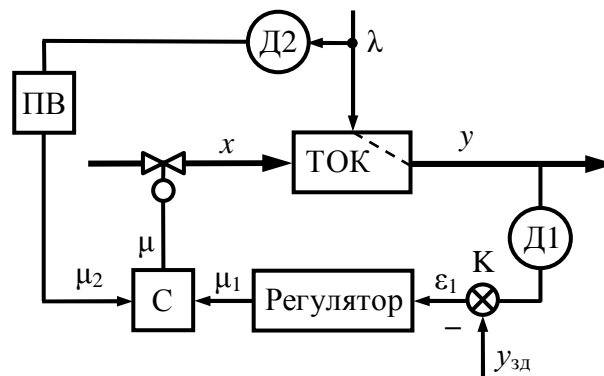


Рис. 3.5. Структурна схема комбінованої системи керування:  
Д1, Д2 – датчики; ПВ – пристрій введення; С – суматор

Таким чином, вона має два канали керування. Один з них діє відповідно до принципу керування за збуренням (Д2 – ПВ – С – ВМ+РО – ТОК) і має розімкнений контур, а другий (Д1 – К – Регулятор – С – ВМ+РО – ТОК) – відповідно до принципу керування за відхиленням і має замкнений контур.

До таких систем зокрема належать багатоконтурні САК, у яких формування керувальних впливів здійснюється від декількох параметрів: головної керованої величини і однієї чи декількох допоміжних, що характеризують наявні збурення. Такою, наприклад, є система регулювання температури на виході теплового об'єкта (печі, реактора, бойлера тощо) спа-

люванням природного газу з одночасним регулюванням співвідношення витрати *газ – повітря* (див. приклад 2.6 у дод. 2).

Для формування керувального впливу в комбінованих системах використовують як безпосередню інформацію про основні збурювальні впливи, так і відхилення керованої величини від заданого значення  $u_{зд}$ , що зумовлюється усіма збуреннями. Завдяки цьому:

1) в комбінованих системах внаслідок компенсаційних зв'язків можна досягти повної компенсації похибок, спричинюваних основними збурювальними та задавальними впливами (можливе досягнення інваріантності);

2) поряд із можливістю повної компенсації похибок, спричинюваних основними впливами, в комбінованих системах за зворотним зв'язком зменшуються похибки, зумовлені другорядними збуреннями, щодо яких немає компенсаційних зв'язків, а також недокомпенсовані похибки від основних збурень і задавального впливу;

3) у разі порушення умов компенсації збурення похибка, що виникає, зменшується замкненою системою, тобто комбіновані системи менш чутливі до змін параметрів розімкнених каналів, ніж розімкнені САК;

4) через наявність компенсаційних каналів у комбінованих системах не так гостро постає проблема стійкості, як у замкнених САК. Такі САК – найбільш досконалі системи, які відзначаються високою точністю керування. Вибір того чи того принципу керування на стадії проектування САК визначається вимогами, поставленими до системи, та умовами її експлуатації.

Комбіновані системи найбільш поширені в хімічній промисловості; їх використовують для керування хімічними, масо- та теплообмінними процесами.

### **3.2. ВИДИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ**

Системи автоматичного керування технологічними об'єктами належать до складних технічних систем і можуть класифікуватися за різними ознаками.

1. *За метою керування* СК поділяють на стабілізувальні й оптимізаційні. Мета керування *стабілізувальної* СК – підтримка критерію керування (КК) на постійному, заздалегідь заданому значенні. Стабілізувальні системи виправдані для простих допоміжних процесів, критерії керування яких варто підтримувати на рівні, визначеному з міркувань ефективного ведення основного процесу. Для складних нестационарних ТОК варто застосовувати оптимізаційні системи.

*Оптимізаційні* СК підтримують КК не на заздалегідь заданому значенні, а на екстремальному для виробничої ситуації, що виникла (наявність сировини й напівфабрикатів, їх якісні показники, стан технологічного устаткування тощо) за дотримання обмежувальних умов (на продукт, параметри технологічного режиму тощо). Оптимізаційні системи значно складніші, ніж стабілізувальні. Вони ґрунтуються на екстремальних регуляторах,

які працюють за принципом «пошуку» екстремуму і служать для досягнення екстремального значення КК, або на ЕОМ.

2. *За мірою участі людини в керуванні.* Ступінь участі людини в керуванні технологічними об'єктами визначається складністю та масштабністю ТОК, метою керування, а також комплексом технічних засобів, які входять до складу системи керування.

Так, для автоматизації простого об'єкта керування (змішувача, відстійника, теплообмінника тощо) зі стабілізацією якоїсь фізико-хімічної величини керування може здійснюватися повністю автоматично, без залучення технологічного персоналу – таку СК називають *системою автоматичного керування*.

Великі ТОК із реалізацією оптимального режиму й складних функцій програмно-логічного керування, захисту, пуску та зупину устаткування можуть бути керовані лише людиною на основі сучасних методів керування за допомогою ЕОМ і засобів збирання, передавання та зберігання інформації. Людино-машинна система, яка забезпечує ефективне функціонування технологічного об'єкта, і в якій збирання та перероблення інформації, потрібної для реалізації функції керування, здійснюється із застосуванням сучасних засобів автоматизації й обчислювальної техніки, називається *автоматизованою системою керування технологічним процесом (АСК ТП)*.

На людину в АСК ТП покладено найбільш складну функцію керування – прийняття рішення щодо зміни режимів роботи ТОК і СК на основі даних, які надаються їй ЕОМ і надходять іншими каналами, ЕОМ же здійснює збирання та передавання інформації, контроль за її вірогідністю, аналіз інформації за певними алгоритмами, підготовку керівного рішення.

Керування, в якому всі функції керування покладено на людину, називається *ручним керуванням*.

3. *За видом використовуваної енергії* розрізняють електричні, пневматичні, гідравлічні та комбіновані системи керування.

4. *За характером залежності між вхідною та вихідною величинами* СК поділяють на безперервні та дискретні. До *безперервних систем* належать СК, в яких передавання інформаційних та енергетичних сигналів відбувається безперервно в часі. У таких системах коло передавання впливів між елементами завжди замкнене. В *дискретних системах* передавання сигналів від одного елемента до другого періодично переривається унаслідок розмикання кола передачі впливів. За безперервної зміни керованої величини в таких системах керувальний вплив реалізується не безперервно, а дискретно, тобто переривчасто, залежно від частоти спрацьовування уведеного в систему імпульсного елемента.

5. *Класифікація за рівнем централізації керування.* Сучасні ТОК складаються з багатьох апаратів, установок, цехів. Керування окремими складовими об'єкта залежно від ступеня взаємного їх впливу, інформаційної потужності, складності та важливості може здійснюватися із самостійних



пунктів або з одного центрального пункту. За рівнем централізації СК поділяються на одно- і багаторівневі. Однорівневі – це системи, в яких керування ТОК здійснюється з одного (централізовані системи) або декількох (децентралізовані системи) пунктів.

*Однорівневі централізовані системи* застосовують переважно для керування порівняно нескладними об'єктами, розташованими на невеликій території. Для сучасних ТОК, що включають велику кількість територіально розосереджених установок, використання однорівневої централізованої системи призводить до ускладнення комунікацій СК та громіздкості пульта керування (ПК). Ускладнюється й робота технологічного персоналу, тому що значна частина отриманої ним інформації не потрібна для безпосереднього ведення технологічного процесу, а віддаленість ПК від установок ускладнює вживання оперативних заходів щодо усунення справностей. Для усунення цих вад використовують *однорівневі децентралізовані системи*, однак децентралізація виключає керування всіма установками ТОК як єдиним технологічним комплексом. Для вирішення цієї проблеми потрібен ще один, більш високий, рівень керування. Такі системи називають *дворівневими*.

Комплекс технічних засобів однорівневих систем – це набір автоматичних пристроїв, що здійснюють безпосередній вплив на процес, виходячи з технологічних критеріїв керування. Це зокрема мікропроцесорні контролери, що виконують задані функції керування (регулювання, програмно-логічне керування, подавання інформації), а також мікро- та міні-ЕОМ малої й середньої потужності. Місце централізації однорівневої системи називають операторською.

Другий рівень керування має зазвичай техніко-економічний або навіть економічний характер. Його неможливо здійснити без потужної обчислювальної техніки, що впливає на ТОК через автоматичні пристрої першого рівня. Пункти керування другого рівня називають диспетчерськими.

6. *За властивостями в усталеному режимі* СК поділяються на статичні й астатичні.

*Статична система* – це система, в якій за збурювального (задавального) впливу, близького до сталої величини, відхилення керованої величини також прямує до сталою значення, яке залежить від цього збурення, тобто після закінчення перехідного процесу керована величина залежно від збурень набуває різних значень.

*Астатична система* – це система, в якій відхилення керованої величини в усталеному режимі за будь-якого усталеного значення збурювального (задавального) впливу дорівнює нулю, тобто після закінчення перехідного процесу керована величина набуває одного й того самого сталою значення.

7. *За способами налагоджування СК*. В процесі роботи звичайно змінюються як характеристики задавального та збурного впливів, так і параметри самої системи. Тому для забезпечення оптимального режиму роботи потрібно налагоджувати систему (змінювати параметри, характеристики,

алгоритм керування, структуру системи). Залежно від того, відбувається налагодження системи людиною чи автоматичною системою, СК поділяються на неадаптивні й адаптивні системи.

*Неадаптивні системи* – це системи, в яких не передбачено автоматичного налагодження – у разі зміни характеристик зовнішніх впливів або параметрів самої системи – для забезпечення оптимального процесу керування. Налаштування такої системи зазвичай виконує людина.

*Адаптивні системи* – це системи, які залежно від умов роботи (характеристик впливів) і параметрів самої системи змінюють своє налагодження, забезпечуючи для кожної сукупності умов найвигідніший режим роботи.

8. *За математичними ознаками* СК поділяються на:

– *лінійні системи*, які описуються лінійними диференціальними рівняннями за значних відхилень регульованої величини від заданого значення;

– *нелінійні системи*, які допускають лінеаризацію та описуються лінійними рівняннями за малих відхилень від рівноваги. Диференціальні рівняння таких систем нелінійні, проте їх можна лінеаризувати, а відтак аналізувати ці системи за лінеаризованими диференціальними рівняннями;

– *суттєво нелінійні системи* (наприклад, релейні).

9. *Залежно від того, чи є місцеві зворотні зв'язки*, СК поділяються на одноконтурні та багатоконтурні.

*Одноконтурною* називається система, яка має тільки один головний зворотний зв'язок. Місцевих зворотних зв'язків у цій системі немає. *Багатоконтурною* називається система, що має як головний, так і місцеві зворотні зв'язки.

10. *За способом (принципом) керування*. Спосіб керування характеризує алгоритми формування керувальних впливів для досягнення мети керування. За цією ознакою системи керування поділяються на розімкнені, замкнені та комбіновані (детально розглянуті в підрозд. 3.1).

11. *За характером процесів керування* розрізняють *детерміновані* (системи із певними змінними та процесами, тобто системи, виходи в яких однозначно визначаються відповідними входами) та *стохастичні* – системи з випадковими змінними та процесами.

12. Останнім часом дедалі частіше застосовують класифікацію *за інформативним принципом*, схвалену на I Міжнародному конгресі з автоматичного керування та регулювання (Москва, 1960). В її основу покладено поняття про повну і неповну початкову інформації.

Під повною початковою інформацією розуміють наявність відомостей, достатніх для проектування і подальшої роботи системи протягом всього терміну її експлуатації. *Системи з повною початковою інформацією* – найбільш вивчений і поширений клас систем керування. Якщо для вирішення поставленого загального завдання, у зв'язку зі зміною зовнішніх умов або інших чинників, в процесі роботи потрібно отримати додаткові відомості, то такі системи називають *системами з неповною початковою*

*інформацією*. Вони становлять клас кібернетичних систем, які поділяються на самоналагоджувальні системи (СНС) та ігрові.

Системи з повною початковою інформацією ще називають *звичайними*. Такі системи бувають із розімкненою і замкненою структурними схемами (відповідно замкнені та розімкнені системи).

*Замкнені САК* називають також системами зі зворотним зв'язком. Вони діють за принципом Ползунова–Уатта й поділяються на три види: стабілізаційні, програмні та слідкувальні. Стабілізаційні системи мають забезпечувати сталі значення вихідної величини об'єкта  $y_{\text{вих}} = \text{const}$ . Прикладом таких систем можуть бути САР навантаження, напруги, частоти, швидкості, тиску газу, температури, рівня тощо. Це досить поширений вид САК. Програмні САР мають забезпечувати зміну регульованої величини за деякою заздалегідь відомою програмою  $y_{\text{вих}} = \text{var} = f(t)$ . Програмні системи широко використовують у верстатах з програмним керуванням, системах програмного гальмування (наприклад, на шахтних підйомних машинах) тощо. Слідкувальні САР також мають забезпечувати  $y_{\text{вих}} = \text{var} = g(t)$ , але принципова їх відмінність від програмних САР полягає в тому, що потрібний для виконання закон зміни регульованої величини  $g(t)$  заздалегідь не відомий, а формується в ході роботи системи. Характерним прикладом слідкувальних САР можуть бути різні системи наведення на ціль в ракетних військах, зенітній артилерії. В цьому разі потрібна програма заздалегідь не відома. Вона залежить від зміни положення об'єкта стеження (літака або ракети) і з великою точністю та швидкістю має відтворюватись системою наведення.

*Розімкнені САК* бувають двох видів: компенсаційні та програмного керування. Вони діють за принципом керування за збуренням. Компенсаційні системи забезпечують формування таких сигналів керування на вході об'єкта, що компенсують дію на нього відповідного збурення  $\lambda(t)$ .

Розімкнені САК програмного керування, на відміну від систем програмного регулювання, мають розімкнену схему і відповідно до заздалегідь заданої програми забезпечують відповідну зміну режиму роботи об'єкта. Потрібна робоча інформація може існувати у вигляді кулачків, профільних дисків, програм на перфокартах, перфострічках тощо. В такий спосіб програмують необхідні зміни технологічного процесу. Прикладом можуть бути ліфтові підйомні установки, де кінцеві вимикачі забезпечують необхідні зміни режиму роботи електропривода залежно від положення кабіни ліфта.

### **3.3. ОСНОВНІ ФУНКЦІЇ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

Автоматизовані системи керування технологічними процесами (АСК ТП) призначені для керування великими технологічними установками, агрегатами, а також виробничими дільницями, що охоплюють групу технологічно пов'язаних агрегатів і допоміжних механізмів.

Автоматизовані системи керування технологічними процесами – це переважно багатофункціональні системи. У практиці автоматизації застосовуються й однофункціональні системи. Так, звичайний регулятор виконує лише одну функцію – мінімізацію сигналу помилки (сигналу неузгодженості між уставкою, яку має виконати регулятор, і фактичним значенням регульованого параметра). Більш складні системи, побудовані на основі засобів обчислювальної техніки, здатні виконувати багато різноманітних функцій.

Що стосується АСК ТП – розрізняють три групи функцій: інформаційні, керувальні, допоміжні.

*Інформаційні функції* підпорядковані поставленій задачі контролю за ходом виробництва. Виконуючи ці функції, АСК ТП дає змогу обслуговуваному персоналу (операторам, диспетчерам, майстрам) вчасно дізнаватися про будь-які відхилення від нормального перебігу технологічного процесу. Забезпечити персонал достовірною інформацією про процес, причому вчасно (тобто оперативно) – завдання, у разі невиконання якого виробництво несе великі невиправні втрати.

До інформаційних функцій належать:

а) безперервна перевірка відповідності параметрів процесу допустимим значенням і негайне інформування персоналу у разі виникнення невідповідностей;

б) вимірювання або реєстрація за викликом оператора тих параметрів процесу, що цікавлять оператора в ході керування об'єктом;

в) інформування оператора (за його запитом) про виробничу ситуацію на тій чи тій ділянці об'єкта керування в момент запиту;

г) фіксування часу, впродовж якого один чи кілька параметрів процесу відхилялися за допустимі межі та коли знову прийшли до норми;

д) обчислення за викликом оператора певних показників, які характеризують якість технологічного процесу і не піддаються безпосередньому вимірюванню;

е) періодичне реєстрування вимірюваних параметрів і обчислюваних показників;

ж) виявлення та сигналізація про настання небезпечних (передаварійних, аварійних) ситуацій.

*Керувальні функції* підпорядковані завданню безпосереднього керування технологічним процесом оптимальним способом.

Окремі рішення щодо керування процесом (керувальні впливи) можуть реалізовуватись у різний спосіб:

– автоматичним впливом на об'єкт керування, минаючи оператора;

– у вигляді рекомендацій операторові, котрі він може прийняти чи відхилити;

– у вигляді впливів, що реалізуються автоматично, але тільки після підтвердження їх оператором;

– у вигляді прогнозованих впливів, які виникли б у разі прийняття того чи того режиму роботи керованого об'єкта (режим може бути запропоновано як оператором, так і самою системою керування).

До керувальних функцій належать:

- а) визначення оптимального режиму для певного моменту часу тому чи тому технологічному агрегату чи об'єкту керування в цілому;
- б) формування та реалізація керувальних впливів, які забезпечують ведення знайденого оптимального режиму;
- в) видання оператору рекомендацій з керування (як на його запит, так і з «ініціативи» системи);
- г) розподіл матеріальних потоків і навантажень між основними технологічними агрегатами;
- д) керування пусками та зупинами агрегатів;
- е) визначення оптимальної тривалості окремих циклів (для процесів, що характеризуються циклічними стадіями);
- ж) розподіл допоміжних механізмів, вантажно-розвантажувальних засобів, оперативне формування заявок на транспортні засоби;
- з) визначення прогнозованих впливів і необхідних додаткових характеристик режиму, що допомогли б оператору приймати ті чи ті рішення щодо керування.

*Допоміжні функції* в різних виробничих процесах істотно різняться і їх важко класифікувати. Проте, можна виділити функції, які трапляються найчастіше:

- а) оперативне коригування змінних і добових завдань на випуск продукції;
- б) облік і звітність з випуску продукції та завантаження основного устаткування за зміну (іноді – за добу);
- в) фіксування ненормальних явищ, які рідко трапляються у керованому об'єкті, для їх подальшого аналізу (наприклад, фіксування послідовності спрацьовування технологічних захистів);
- г) зв'язок із системами керування верхнього рівня (зазвичай – з АСК підприємства);
- д) контроль за справністю функціонування самої АСК;
- е) «стеження» за астрономічним часом і визначення потрібних часових інтервалів.

Для кожної конкретної АСК ТП ніколи не передбачається виконання всіх наведених інформаційних, керувальних і допоміжних функцій. Деякі з них виявляються неактуальними для конкретного об'єкта керування, деякі доцільніше покласти на АСК інших рівнів (наприклад, можна не завантажувати АСК ТП задачами обліку і звітності, вирішуючи ці питання в масштабі всього підприємства за допомогою АСК підприємства).

### 3.4. СТРУКТУРА АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

#### 3.4.1. Інформаційна структура автоматизованої системи керування технологічним процесом

Укрупнену структуру системи керування, що виконує зазначені функції, наведено на рис. 3.6. Об'єкт керування складається (у загальному випадку) з технологічних агрегатів, допоміжних механізмів і транспортних засобів. Зв'язок оператора, який веде технологічний процес, із зазначеними групами устаткування може бути різним. Так, зв'язок з технологічними агрегатами може здійснюватися через засоби вимірювання та керування, розташовані на щиті керування та пульті оператора (на рисунку не показані), а зв'язок з допоміжними механізмами – через засоби виробничого гучномовного зв'язку з операторами зазначених механізмів.

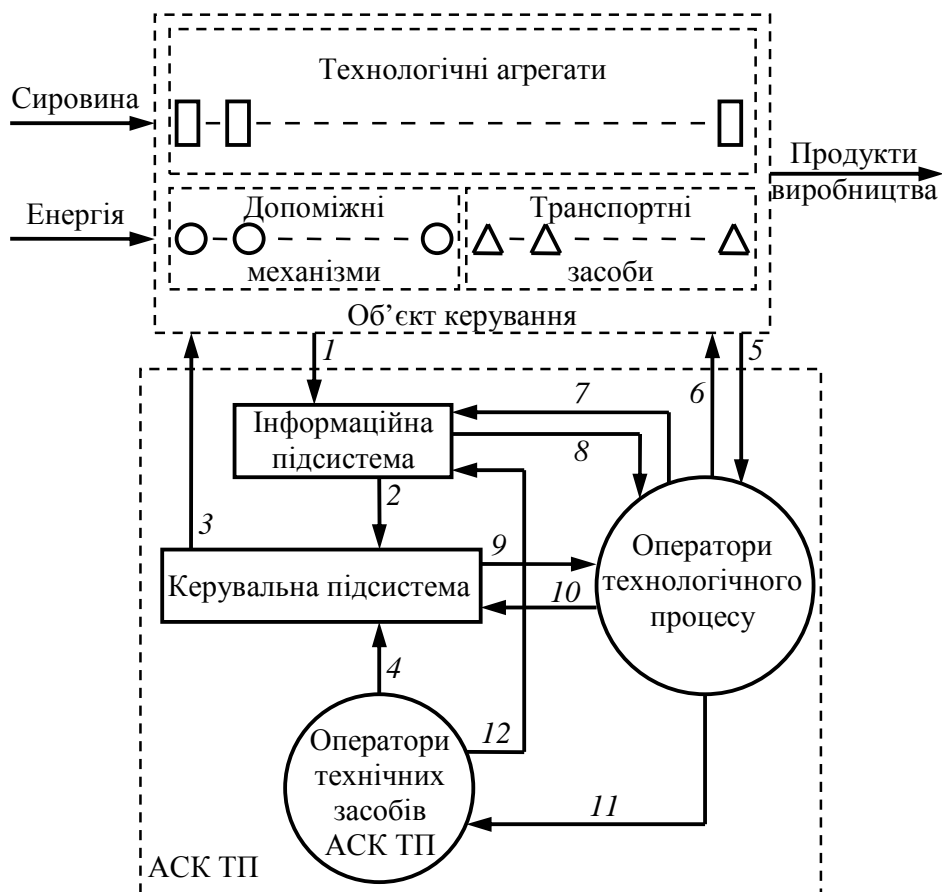


Рис. 3.6. Структура зв'язків у автоматизованій системі керування технологічним процесом

Незалежно від конкретних варіантів реалізації інформаційних зв'язків в АСК ТП їх змістовний бік пояснюється рис. 3.6, де канали зв'язку позначені пронумерованими стрілками. Інформаційна підсистема автоматично збирає дані про значення параметрів, які характеризують хід технологічно-

го процесу, зніманням показань через канал 1 із датчиків, контактів кінцевих вимикачів тощо. Ця інформація повідомляється як операторові – через канал 8, так і керувальній підсистемі (канал 2). Інформація про процес, отримувана оператором не від інформаційної підсистеми, наприклад, від місцевих датчиків, які не входять до її складу, позначена стрілкою 5. Запити оператора про стан об'єкта направляються ним або через інформаційну підсистему каналом 7, або, минаючи її, – каналом 6.

Керувальна підсистема, виконуючи покладені на неї функції, використовує інформацію, отримвану з каналу 2. Сформовані керувальні впливи реалізуються або автоматично (канал 3), або через канали 9 і 6. Запити оператора щодо керувальних функцій позначені стрілкою 10. Оператор процесу в разі потреби дає вказівки персоналу, який відповідає за експлуатацію технічних засобів АСК ТП, використовуючи канал зв'язку 11. Цей персонал здійснює технічне обслуговування керувальної (канал 4) та інформаційної (канал 12) підсистем.

Як впливає з рис. 3.6, інформаційна та керувальна підсистеми утворюють двоярусну структуру. Це доволі характерний, хоча й не єдино можливий варіант. Структуру інформаційних зв'язків у АСК ТП, наведену на рис. 3.6, слід відрізнити від технічної структури, в якій наводять конструктивно самостійні вузли та блоки. Сутність цього розходження можна пояснити таким прикладом. Припустимо, що оператор технологічного процесу має на пульті, за яким він працює, цифровий показувальний прилад. За допомогою спеціальної клавіатури він може викликати на цей прилад параметри процесу, що його цікавлять (наприклад, значення температури в певній точці агрегату – інформаційна функція «б»; стрілка 7 – запит, 8 – відповідь). На цей же прилад оператор може викликати рекомендації щодо керування (наприклад, який тиск знадобиться встановити у деякій точці агрегату для бажаної зміни режиму – керувальна функція «в», стрілка 10 – запит, 9 – відповідь).

У технічній структурі АСК згаданий прилад зв'язаний з відповідною клавіатурою, а змістове значення інформації в ній не вказано. Отже, для розуміння того, як функціонує АСК ТП, потрібно мати у своєму розпорядженні як інформаційну, так і технічну структури системи.

### **3.4.2. Технічна структура автоматизованої системи керування технологічним процесом**

Сукупність усіх технічних засобів, використовуваних у АСК ТП, поданих у вигляді конструктивно самостійних приладів, вузлів, пристроїв, прийнято називати технічною структурою АСК. У цій структурі звичайно вказують також основні зв'язки між приладами та пристроями (допоміжні зв'язки, наприклад, кола живлення, не приводять), тому простий перелік використовуваних технічних засобів (скажімо, у формі таблиці) не являє собою технічної структури.

Технічну структуру АСК зазвичай подають у вигляді блок-схеми, супроводжуваної пояснювальним текстом, у якому вказують можливі режими сукупностей пристроїв (синхронний, асинхронний, з перериванням тощо), а також





– регулювальні органи РО, що здійснюють керувальні впливи відкриттям вентилів і заслінок, зміною швидкості обертання двигунів, режиму роботи насосів тощо.

Біля ТОК встановлюють місцеві щити керування, на яких монтують регулятори, вторинні прилади, а також інші пристрої локальної автоматики (наприклад, нормувальні перетворювачі, що сприймають сигнали низького рівня від термопар і термометрів опору та формують уніфіковані струмові сигнали).

Центральний пульт керування має:

- пульт оператора-технолога ПОТ;
- щити, на яких змонтовано відповідні засоби автоматизації та зв'язку;
- принтер ПРН для реєстрації параметрів та виклику оператора-технолога.

На пульті керування встановлюють:

- аналогові вимірювальні прилади АВП;
- дисплеї Дс для надання оператору-технологу символної та графічної інформації;
- сигнальні табло, які видають оператору-технологу рекомендації щодо ведення технологічного процесу;
- дистанційні задавачі значень керованих параметрів;
- клавіатуру для виклику показників, які характеризують керований процес;
- засоби зв'язку;
- ключі дистанційного керування.

Тут міститься і керувальний обчислювальний комплекс КОК, до складу якого входять:

- пристрої інформаційної підсистеми (комутатори сигналів, аналого-цифрові перетворювачі – АЦП), пристрої, що вказують відхилення параметрів, пристрої пам'яті граничних значень параметрів, пристрої масштабування;
- пристрої керувальної системи (арифметичний пристрій АП, оперативний ОЗП та зовнішній ЗЗП запам'ятовувальні пристрої), пристрій керування ПК;
- цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП), пристрої керування (виконавчі механізми ВМ і регулювальні органи РО);
- робоче місце оператора-технолога, до якого підведено інформаційні та командні органи (пристрої контролю, ключі, кнопки), розміщені на щитах, окремих панелях, приставках до пульта, мнемосхемах із умонтованими індикаторами, електрична друкарська машина, пристрій ручного введення даних ПРВВ.

Обов'язкова складова технічної структури АСК ТП – ПЗО – пристрої зв'язку з об'єктом: комутатори сигналів і АЦП утворюють ПЗО/ПВ (пристрій зв'язку з об'єктом/пристрій уведення); ЦАП, пристрій керування ВМ, регуляторами і РО утворюють ПЗО/ПВ.

Повертаючись до зіставлення інформаційної і технічної структури, ще раз підкреслимо, що вони не тотожні, тож дають різні «зрізи» тієї самої АСК.

Так, інформаційна підсистема на рис. 3.1 означає сукупність усіх засобів, які забезпечують виконання функцій контролю за ходом технологічного процесу. У технічній структурі (рис. 3.7) ці засоби розосереджені: вони розміщені на об'єкті керування, на місцевих щитах, на центральному пульті керування, в керувальному обчислювальному комплексі.

Технічні засоби АСК, наведені на рис. 3.7, використовуються на зосереджених об'єктах. Якщо об'єкт керування розподілені (довжиною 2–3 км), зазначені засоби доповнюються засобами телемеханіки. У такому разі пункти контролю встановлюються поблизу місцевих щитів, а пункти керування – у приміщенні обчислювального комплексу. Канали зв'язку, що їх з'єднують, служать для ущільненого передавання телевимірювань (від датчиків), телесигналізації (від двопозиційних органів) та телекерування (на приводи клапанів, заслінок тощо).

### **3.5. ЗАГАЛЬНИЙ ПОРЯДОК РОЗРАХУНКУ ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ**

*Вибір виду задавального впливу під час проектування систем керування.* Проектуючи системи керування (СК), звичайно виходять із задавального впливу, який найбільш повно відповідає умовам реальної роботи системи. Як типове найчастіше вибирають одиничний ступінчастий вплив  $x(t) = 1(t)$ . В інших випадках доцільно використовувати гармонічні вхідні впливи чи стаціонарні випадкові процеси з відомим енергетичним спектром.

*Порядок розрахунку СК.* Розрахунок системи зазвичай складається з певних етапів складної задачі з багатьма можливими розв'язками [27]. Вибір оптимального варіанта побудови СК залежить від її призначення та вимог до неї: точності, швидкодії, габаритних розмірів тощо. У зв'язку з цим детальний порядок розрахунку кожної конкретної СК універсальним бути не може.

*Вибір початкових даних.* До початкових даних належать характеристики задавальних впливів, збурень і завад: часи регулювання та перерегулювання у разі ступінчастих задавальних впливів; значення динамічних і статичних похибок СК; запаси стійкості за модулем і фазою.

Розробник зазвичай встановлює рід струму, значення напруги та частоти, типи підсилювачів і виконавчого механізму (наприклад, електродвигуна), тип елемента порівняння тощо. Значна частина цих даних є в технічному завданні на проектування системи.

Зазвичай початкові дані встановлюються з урахуванням досвіду проектування й експлуатації типових СК або з інженерних міркувань, пов'язаних з питаннями економіки, експлуатації та розміщення проектованої системи.

*Вибір основних елементів СК.* Здійснюється після уточнення початкових даних. До таких елементів належать: первинний вимірювальний перетворювач, попередній підсилювач, підсилювач потужності, виконавчий двигун, редуктор, джерело живлення. Необхідно встановити значення вхідної та вихідної потужностей, тип обраних елементів та сформулювати вимоги до розрахунку попереднього підсилювача, підсилювача потужності та інших елементів системи.

*Визначення параметрів функціонально необхідних елементів і побудова структурної схеми СК.* Вибравши основні функціонально необхідні елементи системи, потрібно визначити параметри їх у статичному та динамічному режимах роботи: коефіцієнт передачі, сталі часу, передавальні функції чи оператори елементів СК. Зазвичай якась частина параметрів довідкова (з каталогів), а решту визначають розрахунково або експериментально.

На основі визначених параметрів елементів СК складають попередню структурну схему нескоректованої системи.

*Розрахунок статичних характеристик СК за її структурною схемою.* Розраховуючи статичні характеристики СК, визначають усі статичні характеристики її окремих ланок, а також статичну точність системи відповідно до технічних умов. Виконують лінеаризацію статичних характеристик елементів і перевіряють статичну точність СК у межах зумовлених змін зовнішніх умов (температури, тиску тощо).

*Розрахунок окремих елементів СК.* Він охоплює розрахунки попереднього підсилювача та підсилювача потужності, уточнення передавальних функцій окремих елементів системи, узгодження виконавчого елемента з підсилювачем потужності тощо.

*Розрахунок динамічних характеристик СК.* Під час цього розрахунку виконують такі операції: будують логарифмічні амплітудно- та фазочастотну характеристики (ЛАЧХ і ЛФЧХ) нескоректованої системи в розімкненому стані й визначають показники якості СК (точність в усталеному режимі, запаси стійкості за амплітудою та фазою); будують бажані ЛАЧХ і ЛФЧХ відповідно до потрібних показників якості; визначають тип коригувальних пристроїв, їх параметри та місце введення (вмикання) в замкнений контур СК; будують ЛАЧХ і ЛФЧХ скоректованої системи, а також дійсну частотну характеристику замкненої СК і визначають параметри перехідного процесу; оцінюють точність скоректованої системи в усталеному режимі.

Важливий етап розроблення системи керування – *обрання основних елементів СК*, зокрема джерел живлення, підсилювачів, виконавчого механізму тощо. Серед них особливе місце займає вибір джерел живлення та підсилювальних пристроїв.

Основні дані про джерела живлення (рід струму, значення напруги та частоти) під час проектування й розрахунку СК мають встановлюватися на основі техніко-економічного порівняння різних варіантів їх із урахуванням специфічних вимог. З метою зменшення вартості СК слід використовувати виконавчі двигуни змінного струму (асинхронні, дугостаторні асинхронні). Вибір оптимального значення частот, напруги та роду струму зазвичай залежить від умов електроживлення всього комплексу пристроїв, куди входить і СК.

Під час розрахунку СК по можливості потрібно уникати перетворення струму, оскільки наявність перетворювачів веде до підвищення собівартості й експлуатаційних витрат. Обираючи змінний струм, перевагу слід віддавати струму підвищеної частоти, оскільки в цьому разі вдається знизити масу та габаритні розміри апаратури. На практиці для електроживлення СК використовують джерела як постійного, так і змінного струму різної частоти.

Обранню джерел має передувати проведення порівняльних техніко-економічних розрахунків та обґрунтування їх використання.

Важливі функціонально необхідні елементи СК – підсилювальні пристрої, що забезпечують підсилення та перетворення сигналу непогодження до значення, достатнього для керування виконавчими двигунами. В сучасних СК використовують магнітні, електромашинні, напівпровідникові підсилювачі та підсилювачі в мікросхемному виконанні.

*Магнітні підсилювачі* характеризуються високими надійністю та експлуатаційними якостями, великими вібро- й ударостійкістю, високими коефіцієнтом підсилення та переважувальною здатністю, миттєвою готовністю до дії, простотою підсумовування кількох сигналів, зручністю використання з підсилювачами інших типів. До вад цих підсилювачів належить порівняно велика інерційність, складність забезпечення великих вхідних опорів, підвищена чутливість до змін температури, великі габаритні розміри та маса за роботи на промисловій частоті, порівняно висока вартість у разі виготовлення малими партіями. Магнітні підсилювачі для СК можуть мати потужність від часток вата до кількох кіловатів.

*Електромашинні підсилювачі* використовують як підсилювачі потужності для керування двигунами постійного струму. Найбільш поширений їх тип – підсилювач з поперечним полем – спеціальний двокаскадний генератор постійного струму. Для керування електромашинними підсилювачами застосовують малопотужні напівпровідникові підсилювачі або підсилювачі в мікросхемному виконанні.

*Напівпровідникові підсилювачі* вирізняються високими надійністю й економічністю, малими масою та габаритними розмірами, високим коефіцієнтом підсилення, практичною безінерційністю.

Інтегральна мікросхемотехніка відкриває великі можливості мікромініатюризації підсилювачів СК. Вітчизняна промисловість випускає велику кількість серій напівпровідникових і гібридно-плівкових інтегральних мікросхем, до складу яких входить значна кількість лінійних мікросхем, призначених для використання в підсилювальній апаратурі. Застосовуючи інтегральні мікросхеми, розробник СК має змогу формувати різні варіанти принципів схем підсилювачів СК і змінювати в потрібному напрямку їх характеристики.

### **3.6. ОСОБЛИВОСТІ КЕРУВАННЯ ПЕРІОДИЧНИМИ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

У хімічній промисловості використовують як безперервні, так і періодичні технологічні процеси. Характеристика процесу, що дозволяє віднести його до тієї чи тієї групи – це *ступінь безперервності процесу*  $X_n$  [26]:

$$X_n = \tau / \Delta\tau,$$

де  $\Delta\tau$  – тривалість процесу, тобто час, потрібний для завершення всіх стадій процесу, починаючи від моменту завантаження сировини й закінчуючи вивантаженням готової продукції (наявність часової координати

спричиняє потребу в додатковому оснащенні системи керування таймерами або в заміні «звичайних» регуляторів на такі, керованими параметрами для яких, окрім режимних параметрів, властивих безперервним ХТП, є також час);  $\Delta t$  – період процесу, тобто час, що проходить від початку завантаження сировини однієї партії до початку завантаження сировини другої партії.

Для періодичного процесу  $\Delta t > 0$ , а отже,  $X_n < 1$ , для безперервного процесу  $\Delta t \rightarrow 0$ , отже,  $X_n \rightarrow \infty$ . Проміжне місце серед цих крайніх випадків займають напівбезперервні процеси, для яких  $X_n$  лежить у межах від 1 до  $\infty$ .

Періодичні технологічні процеси характерні не тільки для апаратів, що працюють періодично, але і для апаратури безперервного функціонування. У деяких галузях хімічної промисловості основні технологічні процеси здійснюються саме в апаратах періодичної дії.

### **3.6.1. Характеристика періодичних технологічних процесів як об'єктів керування**

Апарати безперервної дії (АБД) мають низку істотних переваг над апаратами періодичної дії (АПД). Вони дають можливість отримувати продукти з більш стабільними якісними характеристиками, більш зручні для автоматизації, вимагають менших експлуатаційних витрат. Позірне зменшення капітальних витрат у разі застосування АПД зводиться нанівець необхідністю встановлювати більші апарати для забезпечення тої самої продуктивності.

Однак і в АБД використовують періодичні процеси, оскільки періодично відбуваються процеси пуску апаратів, їх чищення тощо. Це означає, що основна ознака АПД – *циклічний режим роботи* (проходження об'єктом у визначеній послідовності низки повторюваних станів, зокрема початкового) на досить великому інтервалі часу характерні і для безперервно діючої апаратури, яку в такому разі можна віднести до апаратів напівбезперервної дії з тривалістю циклу, порівнянною з їх міжремонтним пробігом.

У деяких галузях хімічної і мікробіологічної промисловості основні технологічні процеси здійснюються в АПД. До них належать вакуум-апарати і мішалки для готування розчину живильних солей, ректифікаційні апарати, фільтри різних конструкцій, установки для дозування та змішування багатокомпонентних сумішей та ін. Використання АПД у цих випадках зумовлене однією чи декількома причинами, а саме: небезпекою швидкого нагромадження побічних продуктів; потребою у збільшенні частоти періодично виконуваних операцій; обробленням продукту за складною програмою; здійсненню процесу час від часу, багатоасортиментністю та дрібномасштабністю виробництва.

Для узгодження роботи апаратів періодичної дії із безперервно функціонуючим виробництвом їх поєднують у технологічні комплекси, які за безперервної подачі сировини безперервно видають готовий продукт.

Для АПД нестационарний процес з періодично змінюваними характеристиками є природним технологічним режимом. Причому багато керованих величин у період основної робочої стадії змінюються від початкового стану, який характеризується вектором  $x_0$ , до кінцевого, що визначається

вектором  $x_k$ . У загальному вигляді змінюваність однієї з таких змінних можна описати рівнянням

$$x_k = x_0 \pm \int_{\tau_0}^{\tau_k} \varphi(\tau) d\tau, \quad (3.1)$$

де  $\tau$  – час;  $\varphi(\tau)$  – безперервно диференційована функція переходу, що задає траєкторію руху змінної  $x$  зі стану  $x_0$  за  $\tau_0$  до стану  $x_k$  за  $\tau_k$ .

Різниця між поточним значенням змінної  $x$  і її максимальним значенням  $x_m$  (рис. 3.8, *a*) для тих самих умов пропорційна рушійній силі процесу, яка в апаратах періодичної дії часто сталаю в усьому об'ємі апарата, але змінюється у часі, безперервно спадаючи до кінця процесу. Зміна рушійної сили процесу в АПД аналогічна зміні її в напрямку руху основного потоку  $l$  від початкової  $l_0$  до кінцевої  $l_k$  координати (рис. 3.8, *б*) в АБД, що працюють за принципом повного витіснення. В апаратах повного змішування (рис. 3.8, *в*) рушійна сила постійна в усьому об'ємі апарата.

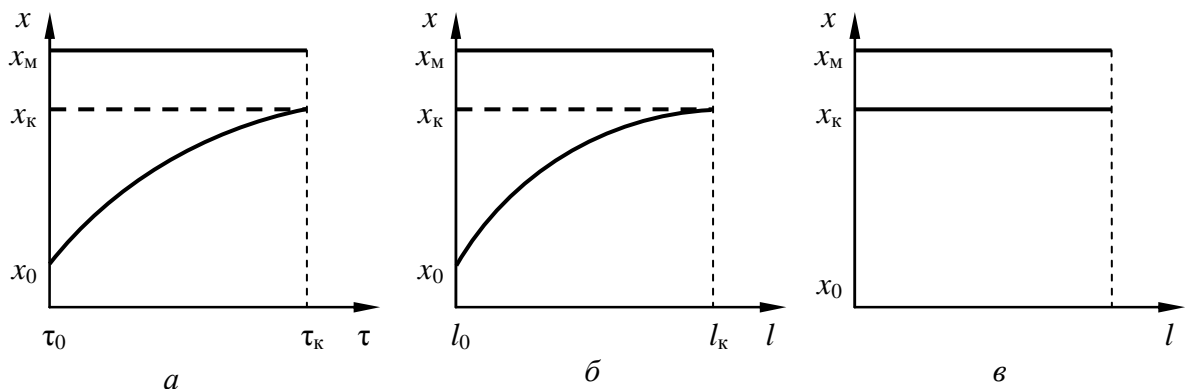


Рис. 3.8. Зміна керованої змінної в апараті:  
*a* – періодичної дії; *б* – повного витіснення; *в* – повного змішування

Наведені особливості реалізації технологічних процесів в апаратах періодичної і безперервної дії дають підстави визначити їх так: в АПД усі стадії технологічного процесу здійснюються в одному місці, але в різний час; в АБД – одночасно, але в різних місцях.

Режими з періодично змінюваними параметрами характерні не тільки для АПД. Вони виникають і в нестационарних АБД, у яких згодом змінюються властивості апарата (наприклад, через накипо- чи нагароутворення) або робоче середовище (наприклад, через нагромадження паразитної мікрофлори в бактерієзрощувальних апаратах), а також у стаціонарних АБД, у яких для інтенсифікації процесу чи з інших причин створюють коливальний режим зміни основних параметрів. Таким чином, для визначення організаційно-технічної ознаки, що характеризує циклічність роботи технологічного апарата, слід визначити часовий інтервал, на якому передбачається вирішувати розглянуту задачу, зокрема й задачу керування.

У часовому інтервалі роботи цих об'єктів виділяють час, протягом якого процес перебігає безперервно  $\tau_{\text{неп}}$ , і час здійснення періодичного процесу  $\tau_{\text{пер}}$ .

Причому під процесом, що перебігає безперервно, у цьому випадку розуміють процес, який відповідно до технологічного регламенту здійснюється з безперервною подачею сировини та вивантаженням готового продукту чи напівпродукту з постійними чи квазіпостійними якісними характеристиками. За періодичного процесу вивантаження здійснюється одноразово після закінчення технологічної операції, під час якої основні параметри процесу змінюються відповідно до технологічного регламенту як функція часу.

Циклічність роботи технологічної апаратури можна характеризувати за допомогою *коефіцієнта періодичності*

$$\eta = \tau_{\text{пер}} / (\tau_{\text{пер}} + \tau_{\text{неп}}) = \tau_{\text{пер}} / \tau_3,$$

де  $\tau_3$  – часовий інтервал, на якому розв’язують задачу керування.

Значення коефіцієнта періодичності дає змогу класифікувати технологічні апарати в такий спосіб:  $\eta = 1$  – АПД;  $0 < \eta < 1$  – апарат напівбезперервної дії;  $\eta = 0$  – АБД.

Найбільшого поширення набули однофункціональні АПД. Однак у багатоасортиментних і дрібномасштабних виробництвах АПД можуть виконувати кілька функцій (багатофункціональні АПД), кожній з яких відповідає свій режим роботи. У разі переходу з режиму на режим може змінюватися і кількість стадій роботи апарата. Найпростішим двостадійним АПД є, наприклад, об’ємний дозатор з операціями набору та випорожнення. Найчастіше використовуються чотиристадійні АПД, які мають такі стадії циклу: завантаження, основну стадію, вивантаження та чищення. В апаратах без підживлювання всі вихідні продукти вводяться в апарат у період його завантаження.

Часові обмеження можуть накладатися як на окремі стадії циклу, так і на весь цикл у цілому. Перші пов’язані з потребою витримати оброблюваний продукт за певних умов протягом заданого часового інтервалу, що гарантує досягнення необхідної якості за умови неможливості безпосереднього контролю якісних характеристик з тих чи тих причин (наприклад, у разі термооброблення продуктів у затареному вигляді). Другі виникають у разі узгодження роботи АПД із наступним у технологічному потоці устаткуванням (останнє може бути й устаткуванням безперервної дії), яке впливає на визначення початку вивантаження АПД. Жорсткі циклові обмеження виникають зазвичай у разі послідовно-часового вмикання АПД, що пов’язано з однією, спільною для групи апаратів системою їх завантаження. У разі можливості паралельного завантаження декількох АПД, поєднаних надалі спільним безперервним технологічним потоком, часові обмеження можуть розглядатися як гнучкі.

Вимоги до функції переходу можуть бути визначені технологічним регламентом чи бути довільними. Нестационарна циклічність (змінна тривалість циклу) виникає як під впливом перешкод, так і внаслідок керувальних впливів.

Технологічний процес в АПД може проходити за сталості різних параметрів, наприклад, постійного об’єму робочого середовища, тиску, температури тощо.

### 3.6.2. Особливості побудови систем керування періодичними технологічними процесами

Як зазначалося, найчастіше періодичні технологічні процеси реалізуються в апаратах періодичної дії. Під час розроблення системи керування комплексом такої апаратури виникає потреба у вирішенні завдань автоматизованого керування окремим АПД і узгодження роботи комплексу АПД із роботою іншого устаткування безперервної дії.

Зупинимося на методиці розв'язання задач, які виникають у разі розроблення систем автоматизованого керування окремим АПД, виділивши такі основні етапи: вибір критерію керування та формулювання мети керування; розроблення математичної моделі АПД; вибір структури системи керування; синтез алгоритмів керування; технічна реалізація системи керування.

**Вибір критерію керування АПД.** Критерій керування добирають на основі аналізу критерію керування комплексом АПД й узагальнених економічних показників виробництва. Критерієм керування такими апаратами може бути один з таких показників: тривалість циклу ( $\tau_{\text{ц}}$ ); кількість одержуваного за цикл ( $b_{\text{ц}}$ ) або за одиницю часу ( $b_{\text{ц}}/\tau_{\text{ц}}$ ) продукту; питома витрата сировини чи енергії за цикл  $\gamma_{\text{ц}} = g_{\text{ц}}/b_{\text{ц}}$  (де  $g_{\text{ц}}$  – кількість сировини чи енергії, витрачена за цикл), або питомий вихід продукту за цикл  $\beta = 1/\gamma_{\text{ц}} = b_{\text{ц}}/g_{\text{ц}}$ ; відхилення величини, що характеризує якість одержуваного в кінці циклу продукту, від її номінального значення. За умови використання одного з наведених показників як критерію керування мета керування зазвичай формулюється так, щоб максимальне (мінімальне) його значення спричинювало максимізацію технологічної складової прибутку.

**Розроблення математичної моделі АПД.** Ця модель має логіко-динамічну структуру, оскільки такі апарати можуть бути віднесені до складних систем, для опису яких потрібно використовувати аналітичні та логічні залежності. Логічна частина моделі включає логічні умови, що визначають стан об'єкта і зовнішні впливи, наявність яких створює умови для переходу від однієї операції циклу до другої, та команди (мікрокоманди), дією яких цей перехід здійснюється. Динамічна частина моделі описує реакцію інерційного об'єкта на команди (мікрокоманди), що надходять на початку операції, та збурювальні впливи. Для АБД нестационарний режим – природний технологічний режим на відміну від АПД, для яких характерний квазістационарний режим, що складається з низки аналогічних періодично повторюваних незавершених перехідних процесів.

Особливість динамічних моделей АПД полягає в їх нелінійності та нестационарності. Ці властивості пов'язані насамперед з тим, що перехід від однієї стадії циклу до другої може викликати не тільки зміну коефіцієнтів диференціальних рівнянь моделі, але і зміну її структури (модель зі змінною структурою). Причому кінцеві умови попередньої стадії завжди початкові для наступної. Нестационарність динамічної моделі АПД може бути також зумовлена зміною їх властивостей від циклу до циклу.



Таким чином, залежно від часового інтервалу, на якому розв'язується задача керування АПД, його математична модель, будучи моделлю зі змінною структурою, може враховувати внутрішньостадійну, внутрішньоциклову та міжциклову нестационарності та нелінійності.

У деяких випадках для лінеаризації нелінійних моделей АПД, якщо їх нелінійність має внутрішньостадійний характер, можна використовувати окремий математичний опис кожної операції робочої стадії.

**Вибір структури системи керування АПД.** У загальному випадку така система складається з логічної і динамічної підсистем. Логічна підсистема реалізує алгоритм керування, яким фактично є логічна частина моделі. Динамічна підсистема забезпечує керування технологічним процесом у період операції чи стадії, найчастіше робочої.

Вибір структури системи керування визначається сформульованою метою керування, класифікаційними ознаками АПД як об'єкта керування, наявністю необхідних технічних засобів і насамперед – вимірювальних перетворювачів для одержання інформації про значення керованих величин. Якщо зазначених перетворювачів немає, система автоматизованого керування апаратом, що не підживлюється, може будуватися без динамічної підсистеми. У тих самих випадках, але для апаратів з підживлюванням, динамічна підсистема проектується незамкненою з програмним керуванням витратами компонентів підживлювання, а за наявності технічних засобів для вимірювання керованих параметрів – із програмним керуванням значеннями основних керованих величин.

**Синтез алгоритмів керування АПД.** Він містить у собі синтези алгоритмів логічного і динамічного керування. Синтез алгоритму логічного керування здійснюється переходом від логічної частини моделі до логічної структури системи керування. Кількість алгоритмів динамічного керування визначається кількістю стадій, на яких доводиться розв'язувати задачу динамічного керування, результатом розв'язання якої найчастіше є програма заміни змінних у функції часу чи інших змінних. Розрізняють кілька способів побудови таких програм. У найпростішому випадку синтез програми обмежується відтворенням вимог технологічного регламенту, що жорстко задає функцію переходу і, отже, траєкторію руху об'єкта керування від початкового до кінцевого стану. Якщо технологічний регламент не визначає цю траєкторію, а тільки накладає обмеження на характер змінювання змінних, то можливі два переходи до синтезу програми. Перший – у результаті розв'язання задачі оптимального керування, другий – евристичними методами з використанням досвіду кращих операторів АПД (методи експертних оцінок). Можливий також інший підхід, коли за наявності обмежень, які накладаються на значення рушійної сили процесу, алгоритм оптимального керування реалізується за допомогою нелінійності релейного типу та прогнозувальної фізичної моделі.

**Технічна реалізація системи керування.** Забезпечує реалізацію синтезованих алгоритмів керування за найкращих показників ефективності функціонування системи. На цьому етапі можлива мінімізація логічної

структури системи керування відомими методами. Для обрання елементної бази потрібні також порівняльні розрахунки, що визначають ефективність експлуатації системи за різних варіантів її апаратної реалізації з погляду надійності й економічної ефективності.

### 3.6.3. Керування апаратами періодичної дії

Система керування АПД, як і його математична модель, має логіко-динамічну структуру, тобто складається з підсистем, що здійснюють перемикальні (логічна підсистема) і динамічні (динамічна підсистема) впливи.

Перемикальні впливи можуть бути цикловими і внутрішньоцикловими. Перші формують інтегральні впливи для всього циклу в цілому: наприклад, початкове завантаження апарата; загальна кількість сировини чи вихідного продукту за цикл; тривалість циклу тощо. Другі забезпечують перехід від однієї стадії чи операції циклу до другої за досягнення необхідних логічних умов.

Динамічні впливи пов'язані з безперервними змінами однієї чи кількох складових узагальненого потоку, що включає потоки маси, її компонентів, теплоти і кількості рухів упродовж якої-небудь стадії чи операції циклу.

Залежно від умов роботи, ієрархії побудови систем керування, наявності необхідних технічних засобів, можливі різні варіанти сполучення названих підсистем і відповідних задач керування. Найбільшого поширення набули два варіанти таких сполучень, які приводять до утворення логічної чи логіко-динамічної систем керування. Відсутність динамічної підсистеми в першому варіанті зазвичай пов'язана з тим, що відповідний АПД працює без підживлення, а змінювання інших компонентів узагальненого потоку не дає можливості розв'язувати задачу динамічного керування.

Логічна система (підсистема) керування АПД може проектуватися з інтегральними і внутрішньоцикловими чи тільки з внутрішньоцикловими перемикальними впливами. Останній різновид логічних систем (підсистем) керування використовується тоді, коли задачі, характерні для інтегральних перемикальних впливів, зважуються системами керування більш високого рівня ієрархії керування, наприклад, системою керування групою АПД.

Динамічні підсистеми можна класифікувати за належними умовами зміни керованих змінних. У разі потреби їх стабілізації – функція переходу  $\varphi(\tau) = 0$  (див. рівняння (3.1)) – застосовуються системи автоматичної стабілізації. Однак в умовах функціонування АПД, пов'язаних з нелінійністю, а подеколи і нестационарністю їх динамічних властивостей у більшості каналів керованих впливів, найбільш доцільним є використання систем стабілізації зі змінною структурою.

Більшість керованих змінних протягом робочої стадії циклічного технологічного процесу змінюються від початкового стану, що характеризується вектором  $X(\tau_0)$  (лівий кінець траєкторії), до кінцевого стану, який визначається вектором  $X(\tau_k)$  (правий кінець траєкторії), тобто процес проходить за  $\varphi(\tau) \neq 0$ . Якщо в цих умовах  $\varphi(\tau)$  задана технологічним регламен-

том, то задачу динамічного керування розв'язують за допомогою системи програмного керування.

Застосовують як замкнені, так і незамкнені за основною змінною системи програмного керування. Незамкнені використовують у вигляді систем програмного керування складовими узагальненого потоку, якщо немає вимірювальних перетворювачів, потрібних для отримання інформації про основні керовані змінні.

Якщо функція переходу  $\varphi(\tau)$  не задана технологічним регламентом, то виникає варіаційна задача оптимального керування, окремий випадок якої – задача термінального керування (керування кінцевим станом). У цьому разі початкове і кінцеве значення векторів керованих змінних фіксовані:  $X(\tau_0) = X_0$  та  $X(\tau_k) = X_k$  – тому ці задачі називають також задачами з фіксованими (закріпленими) кінцями, на відміну від задач з рухливими кінцями (задача нетермінального керування). Для випадку динамічного керування робочою стадією АПД вільним зазвичай є тільки правий кінець. Задачі з фіксованими і вільними кінцями залежно від наявності тимчасових циклових обмежень можуть бути як з варійованим, так і не варійованим часом закінчення процесу.

Залежно від використовуваної математичної моделі та зворотного зв'язку розрізняють три класи алгоритмів оптимального керування:

1) алгоритми аналітичного керування без використання зворотного зв'язку, застосовувані для добре визначуваних об'єктів, тобто для об'єктів з повною інформацією;

2) алгоритми аналітичного керування з використанням зворотного зв'язку, застосовувані для об'єктів з неповною інформацією;

3) пошукові алгоритми (з використанням зворотного зв'язку за відсутності математичних моделей об'єктів керування), застосовувані для погано визначуваних об'єктів.

Розв'язання задач оптимального керування за допомогою алгоритмів першого і частково другого класу призводить у кінцевому рахунку до потреби у реалізації програмних керувань, поданих у функції часу. Системи програмного керування можуть використовуватися також замість оптимальних у разі керування складними циклічними процесами, коли побудова останніх ускладнена браком необхідних вимірювальних перетворювачів чи наявністю великої кількості технологічних обмежень. У цьому разі як функцію переходу використовують програму, отриману в результаті спостереження за кращими операторами, що здійснюють ручне керування процесом. Реалізацію таких програм здатні забезпечити системи керування на базі експертних оцінок, а також системи керування, побудовані на базі *fuzzy*-логіки (нечітких множин).

Більшість АПД з погляду вироблення динамічних керувальних впливів є об'єктами з неповною інформацією, тому найбільш перспективний тут другий клас алгоритмів, у якому можна виділити два підкласи:

*перший* – керування за моделлю з постійними параметрами та використанням зворотного зв'язку безпосередньо в каналі керування;

*другий* – керування за моделлю з корекцією параметрів та використанням зворотного зв'язку для адаптації моделі.

### 3.6.4. Керування комплексом апаратів періодичної дії

Для узгодження роботи АПД з безперервним виробництвом їх об'єднують у технологічні комплекси, що в разі безперервної подачі сировини чи вихідного напівпродукту безперервно видають готовий продукт за рахунок підключення одних апаратів після закінчення вивантаження інших. У найбільш загальному випадку такий технологічний комплекс може містити  $N$  паралельних каналів із  $n$  паралельно увімкненими апаратами у кожному з них. Для розв'язання задач керування комплексом АПД мають значення не тільки кількість паралельних каналів комплексу та кількість апаратів у кожному з них, але й можливість одночасного завантаження чи вивантаження декількох АПД. Надалі розрізнятимемо технологічні комплекси АПД із послідовно-часовим чи паралельно-часовим завантаженням або вивантаженням.

За послідовно-часового завантаження технологічний комплекс має у своєму розпорядженні таку поточно-транспортну завантажувальну систему, яка одночасно може здійснювати завантаження тільки одного АПД, за паралельно-часового завантаження можливе одночасне завантаження декількох АПД. Аналогічно – залежно від можливості одночасного вивантаження декількох АПД – розрізняють технологічні комплекси з послідовно-часовим і паралельно-часовим вивантаженням. Останні зазвичай мають на виході накопичувальні резервуари, до яких у період вивантаження можуть підключатися одночасно кілька АПД.

Комплекси з паралельно-часовим завантаженням і вивантаженням мають більшу гнучкість у керуванні порівняно з тими, що мають послідовно-часове завантаження і вивантаження. Особливо це стосується тих систем керування, де основні керування пов'язані з часом початку завантаження і вивантаження АПД.

#### Контрольні запитання та завдання

1. У чому полягають особливості принципу керування Понселе–Чиколева? Які переваги та вади йому притаманні?
2. Чим вирізняється принцип керування Ползунова–Уатта? Які переваги та вади йому притаманні?
3. У чому полягають особливості використання комбінованих систем керування? Які переваги їм притаманні?
4. За якими ознаками класифікують системи керування?
5. Наведіть основні функції автоматизованих систем керування технологічними процесами.
8. Що включає загальний порядок розрахунку основних елементів систем керування?
9. Чим відрізняється керування періодичними технологічними процесами від керування безперервними процесами?
10. На які основні етапи поділяють розроблення систем автоматизованого керування окремим АПД?
11. Як поділяють алгоритми оптимального керування АПД? За яких умов використовують той чи той алгоритм?
12. Які особливості керування комплексом АПД?

## 4. ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВОЇ ТА МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ ТЕХНІКИ У СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ТА КЕРУВАННЯ

Сучасний етап розвитку техніки характеризується дедалі інтенсивнішим упровадженням у різноманітні галузі МП, які радикально змінюють властивості багатьох пристроїв і дають нові можливості їх застосування. За широтою та ефективністю застосування МП одне з перших місць посідає інформаційно-вимірювальна техніка, оскільки вдосконалення конструкції та функціональне ускладнення цифрових вимірювальних приладів зумовило створення низки приладів і вимірювальних систем з ускладненою цифровою обробкою.

### 4.1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО БУДОВУ МІКРОПРОЦЕСОРІВ І МІКРОПРОЦЕСОРНИХ СИСТЕМ

*Мікропроцесор* – функціонально закінчений, керований збереженою у пам'яті програмою (здебільшого малорозрядний) пристрій обробки цифрової інформації, виконаний у вигляді однієї чи декількох великих і надвеликих інтегральних схем. Цей пристрій називають мікропроцесором, оскільки він за своїми функціями та структурою нагадує спрощений варіант процесора звичайних ЕОМ і виконує певні функції центрального процесора програмованої ЕОМ.

Схему типового МП, широко застосовуваного в цифрових вимірювальних приладах (ЦВП), показано на рис. 4.1, а.

*Генератор тактових імпульсів* – джерело послідовності прямокутних імпульсів, за допомогою яких здійснюється керування роботою МП у часі. Для сучасного МП зовнішній генератор тактових імпульсів не потрібен – він міститься безпосередньо в його схемі.

*Арифметико-логічні пристрої* зазвичай служать для виконання простих операцій: додавання, віднімання, різних пересилань типу «регістр – регістр», «регістр – пам'ять», «регістр – зовнішній пристрій», різноманітних зсувів та операцій булевої алгебри над початковими операндами.

До складу *блока внутрішніх регістрів* входять як регістри, доступні програмістові, тобто ті, зміст яких можна змінювати безпосередньо, так і недоступні для нього регістри тимчасового зберігання тощо.

*Пристрій керування* координує роботу арифметико-логічних пристроїв, блока внутрішніх регістрів і деяких інших пристроїв МП у процесі виконання команди, що надійшла в процесор. Мікропроцесор має внутрішню шинну організацію, що переходить у зовнішні шини: шину керування, шину даних, шину адреси.

*Шина даних.* Це двонапрявлена шина: по ній дані можуть спрямовуватися в МП або від нього. Одночасне передавання даних в обох напрямках

неможливе. Ці процедури розведені в часі застосуванням часового мультиплексування.

*Шина адреси.* По цій шині інформація передається тільки в одному напрямку – від МП до модуля пам'яті або введення–виведення.

*Шина керування.* Її призначення – передавання сигналів, що обслуговують взаємодію, синхронізацію функціонування всіх модулів системи і внутрішніх вузлів МП. За допомогою сигналів цієї шини можна у певних межах змінювати конфігурацію мікро-ЕОМ, створюваної на базі МП, підключаючи до шини керування відповідно організований невеликий зовнішній жорсткий автомат.

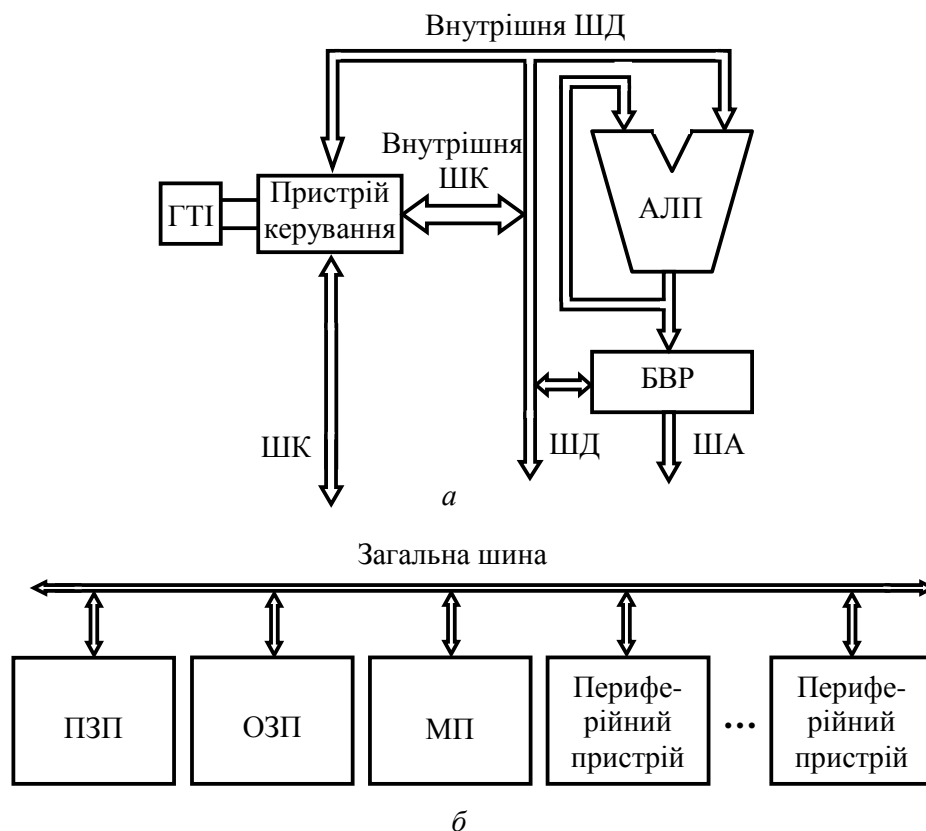


Рис. 4.1. Архітектура типових: *a* – МП; *б* – мікро-ЕОМ;  
 ГТІ – генератор тактових імпульсів; АЛП – арифметико-логічний пристрій;  
 ШД – шина даних; ШК – шина керування; ША – шина адреси; БВР – блок  
 внутрішніх регістрів; ПЗП – постійний запам'ятовувальний пристрій;  
 ОЗП – оперативний запам'ятовувальний пристрій

До шини даних, що має розрядність самого МП, підключають зовнішні пристрої системи: пристрої пам'яті та порти. Шина даних двонапрявлена, як частково й шина керування. Від МП по шині адреси передаються адреси відповідних зовнішніх пристроїв та пам'яті. Ємність адресованої пам'яті коливається від 64 кбайт до 1 Мбайт слів з розрядністю від 8 до 32 біт. Сама пам'ять системи розділяється на ті самі типи й за тими самими ознаками, що й у великих ЕОМ, за винятком того, що в МП зазвичай немає поділу на пам'ять даних і пам'ять команд, тобто немає двох роздільних шин даних.

Застосування МП у вимірювальній техніці дає змогу стрімко підвищити точність приладів, значно розширити їх можливості, підвищити надійність, виконати завдання, які раніше взагалі не розглядали. Основні функції МП у ЦВП такі:

*вимірювання* – керування аналого-цифровим перетворенням; лінеаризація функції перетворення; автоматичний вибір границь вимірювання; вибір каналів і типів вимірювання; компенсація завад; вилучення систематичних похибок;

*оброблення* – нагромадження масивів вимірювальної інформації; непряме вимірювання; статистична та інші види обробки; стискання даних; адаптація до вхідного сигналу;

*керування* – приймання керувальних впливів оператора; налагодження приладу на режим роботи; контроль за діями оператора з можливістю коректувати його помилки; видача довідкової інформації; сигналізація в екстремальних ситуаціях;

*відображення* – керування роботою системи відображення інформації; зберігання результатів попередніх вимірювань; відображення текстової інформації великого обсягу; відображення графічної інформації; допоміжна та сервісна інформація (час, дата тощо);

*інтерфейсні функції* – керування інтерфейсом; робота в комплексі з іншими ЦВП;

*тестові функції* – самотестування; калібрування вимірювальних каналів.

Як видно з наведених можливих функцій МП, його застосування сприяє стрімкому поліпшенню характеристик ЦВП та керування його функціонуванням одночасно з ускладненням розв'язуваних задач. Оскільки алгоритми обробки вимірювальної інформації постійно ускладнюються, потрібно підвищувати і вимоги до обчислювальної потужності МП, що спонукає до створення та застосування спеціалізованих співпроцесорів. Для ЦВП також створюють багатопроцесорні системи керування зі спеціалізацією функцій процесорів: процесор введення–виведення, процесор керування, процесор обробки тощо.

Мініатюрність, мала маса і мале споживання енергії уможливили ввімкнення МП безпосередньо в електронну схему вимірювальних пристроїв, засобів автоматичного регулювання та керування. Мікропроцесор набагато дешевший, більш економний у роботі та надійніший за процесори, побудовані на інтегральних схемах малого і середнього рівня інтеграції. Позаяк основу МП становлять великі чи надвеликі інтегральні схеми із програмованою логікою, він замінив собою багато типів інтегральних схем з незмінною, фіксованою логікою. Змінюванням програм МП досягається розв'язання безлічі різноманітних задач.

Мікропроцесор використовують зазвичай у складі мікропроцесорного комплекту (набору), що являє собою сукупність спеціально розроблених окремих мікропроцесорних та інших інтегральних схем, сумісних за конструктивно-технологічними даними, що дає змогу скласти їх в єдине ціле. Мікропроцесорні комплекти призначені для побудови цифрових керувальних обчислювальних пристроїв із широкими функціональними можливостями і

єдиним математичним забезпеченням, таких, як мікропроцесорні системи, мікро-ЕОМ, мікроконтролери й інше.

*Мікро-ЕОМ* – це конструктивно закінчений обчислювальний пристрій, побудований на основі мікропроцесорного комплексу інтегральних схем в окремому корпусі з джерелом живлення, пультом керування, вузлами введення–виведення інформації, що дає змогу використовувати його як автономний незалежно від працюючого пристрою зі своїм програмним забезпеченням. Мікро-ЕОМ будують за структурою більш простою, ніж звичайні ЕОМ. Основу цієї дуже гнучкої структури, названої магістрально-модульною (рис. 4.1, б), становить загальна магістраль (загальна шина), до якої приєднуються необхідної номенклатури та кількості пристрої машини, виконані у вигляді конструктивно закінчених модулів, сполучених один з одним за допомогою інтерфейсів.

*Інтерфейс* (від англ. *interface* – взаємозв'язок) – сукупність ліній і шин сигналів, електронних схем і алгоритмів, призначених для здійснення обміну інформацією між пристроями цифрової обчислювальної техніки (ЦОТ).

*Мікроконтролер (контролер)* – пристрій логічного керування, виконаний на основі мікропроцесорів чи мікро-ЕОМ.

*Мікропроцесорна система* – зібрана в одне ціле сукупність взаємодіючих великих інтегральних схем мікропроцесорного комплексу, яка організована в обчислювальну або керувальну систему з МП як вузлом обробки інформації.

Узагальнену структуру мікропроцесорної системи показано на рис. 4.2. Більшість структурних елементів, які входять до складу системи, було розглянуто.

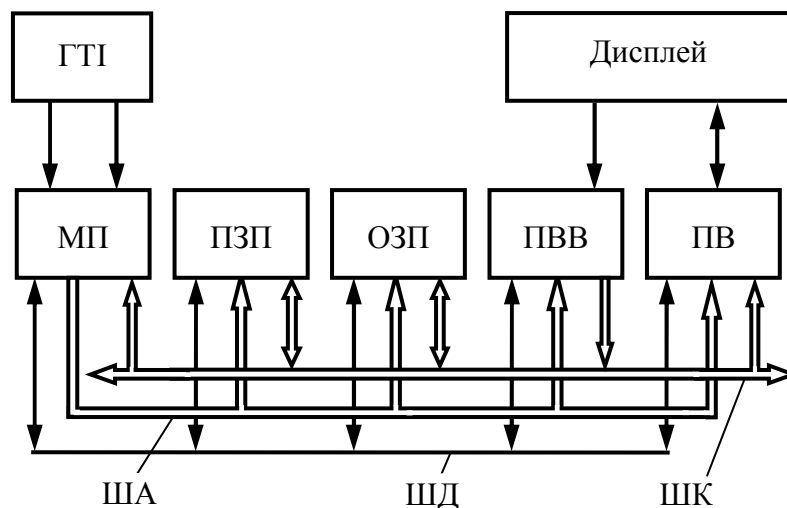


Рис. 4.2. Узагальнена структура мікропроцесорної системи:  
ПВВ – пристрій введення; ПБ – пристрій виведення

*Пристрій введення–виведення.* Пристрій введення виконує введення в систему даних, які підлягають обробці. Пристрій виведення перетворює вихідні дані (результат обробки інформації) у форму, зручну для сприйняття користувачем, подальшої обробки чи зберігання.



Особливість структури мікропроцесорної системи полягає в магістральній організації зв'язків між модулями, що входять до її системи, за допомогою трьох шин: шини адреси, шини даних, шини керування. Ці шини з'єднують МП із запам'ятовувальними пристроями (оперативним ОЗП і постійним ПЗП) та інтерфейсами введення–виведення, унаслідок чого стає можливим обмін даними між окремими модулями системи.

Перевага шинної структури – можливість підключення до мікропроцесорної системи нових модулів, наприклад, кількох блоків (оперативних і постійних) для одержання потрібного обсягу пам'яті.

## **4.2. ВИКОРИСТАННЯ МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ ТЕХНІКИ У ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДАХ І СИСТЕМАХ**

### **4.2.1. Особливості застосування мікропроцесорних вимірювальних приладів**

Сучасні мікропроцесорні вимірювальні прилади – це засоби вимірювання, що здійснюють двосторонню взаємодію – з оператором і системою збирання інформації, та односторонню – з об'єктом вимірювання та навколишнім середовищем. Застосування у вимірювальних приладах МП, що мають можливості програмної обробки інформації, вводить у ці прилади певний «інтелект» і дає змогу не тільки поліпшити їх параметри, але й надати абсолютно нових якостей. Розглянемо деякі властивості вимірювальних приладів із мікропроцесорним керуванням.

*Розширення вимірювальних можливостей.* Застосування МП дає змогу істотно поповнити перелік параметрів сигналів і характеристик пристроїв. Це пов'язано передусім з використанням непрямих вимірювань.

Дійсно, за командою, одержаною з клавіатури, автоматично, відповідно до заданої програми, визначаються режими вимірювань, запам'ятовуються результати прямих вимірювань, виконуються потрібні обчислення і видається значення вимірюваної фізичної величини на дисплей. Хоча вимірювання за своєю природою залишаються непрямыми, оператор сприймає їх як прямі, оскільки, підключивши прилад до об'єкта дослідження, безпосередньо одержує результат вимірювання. Ще ефективніші мікропроцесорні системи для сукупних вимірювань.

*Поліпшення метрологічних характеристик.* Наявність у приладі МП дає змогу скоригувати чи вилучити систематичні похибки і зменшити вплив випадкової складової похибки. Для усунення зміщення нуля, наприклад у цифровому вольтметрі, його вхідні затискачі замикають і заземлюють. При цьому значення, одержане на виході АЦП, характеризує рівень нуля. Воно запам'ятовується і вираховується з показань приладу. Випадкову складову похибки вимірювання не можна видалити, однак її вплив можна зменшити раціональною обробкою результатів спостережень. Багаторазові вимірювання з наступним усередненням їх результатів – ефективний спосіб зменшення впливу випадкової похибки на результат вимірювання.

Інваріантність, реалізована за допомогою МП, дозволяє додатковими вимірюваннями й операціями над ними так коригувати результат вимірювання, щоб у відомих межах зробити результат вимірювання нечутливим до зовнішніх умов, змін внутрішніх параметрів приладу та інформативних параметрів вимірюваного сигналу.

*Сервіс.* У процесі взаємодії приладу з оператором йому надається значний сервіс як щодо зручної форми результатів вимірювання (наприклад, у натуральних і логарифмічних одиницях, полярних або прямокутних координатах), так і щодо спрощення керування приладом. Легко реалізуються нормалізація результату та збільшення інформативності зображення результату вимірювання через змінювання кольору, мигтіння, звукову сигналізацію тощо.

*Організація вимірювальних систем.* Прилад, що містить МП, зазвичай споряджений (або може бути доповнений) різноманітними інтерфейсами, що уможливають приєднання його до міні- або мікро-ЕОМ. Це дає змогу об'єднувати певну сукупність приладів у єдину вимірювальну систему. Особливо слід вирізнити можливість реалізації діагностики в мікропроцесорних вимірювальних приладах. Це визначає ступінь придатності приладу для введення його в автоматичні системи.

У процесі розроблення вимірювальних приладів і систем, які містять МП, найважчим є програмне забезпечення. Труднощі його розроблення зумовлені потребою опанувати спеціалістами основ програмування, високою вартістю програмного забезпечення, яка в кілька разів перевищує апаратні затрати, і складністю налагоджувальної процедури, що потребує застосування спеціальних пристроїв налагодження технічних засобів спільно з програмним забезпеченням.

*Обмежена швидкодія МП.* Розглядаючи питання про застосування МП, слід ґрунтовно проаналізувати його швидкодію, з'ясувати, чи достатня вона для вирішення сформульованого завдання. У цьому разі слід орієнтуватися в довідкових даних, які характеризують швидкодію МП.

*Труднощі вибору базового МП.* Мікропроцесор – основний елемент мікропроцесорної системи, яка утворює ядро мікропроцесорного вимірювального приладу. Промисло виробляють багато типів МП, і кількість нових розробок стрімко зростає. Достатня кількість різноманітних мікропроцесорних засобів, які не завжди з належною повнотою висвітлені в довідкових виданнях, хоча й надає великі можливості, але, поза сумнівом, ускладнює процедуру вибору базового МП для проектного засобу вимірювання.

#### **4.2.2. Похибки вимірювання мікропроцесорних вимірювальних приладів**

Розгляд процедури процесорних вимірювань як послідовності виконання аналогових, аналого-цифрових і цифрових вимірювальних перетворень дає змогу уявити похибку у вигляді суми відповідних компонентів. Відмінність результатів цифрових вимірювальних перетворень від потрібних

визначають за процесорними похибками вимірювань. Для вивчення цього виду похибок розрізняють три причини їх виникнення:

*алгоритмічна похибка*, зумовлена відмінністю прийнятого алгоритму вимірювання від адекватного (гіпотетичного);

*похибка округлення*, спричинена наявністю округлень проміжних цифрових перетворень у результаті вимірювання;

*динамічна процесорна похибка*, джерело виникнення якої – обмеженість швидкодії МП.

У вимірювальних приладах МП застосовують для оцінювання інструментальних похибок, які можуть виникнути під час виконання обчислювальних процедур через обмеженість розрядної мережі процесора. Їх називають похибками округлення. Вибираючи алгоритми обчислень, зважають на таку умову: абсолютна похибка обчислень не має перевищувати  $\Delta_0 = 2^{-n}$ , де  $n$  – розрядність МП.

Операції округлення в МП виконують зазвичай простим відсіканням неврахованих розрядів або симетричним округленням з урахуванням значення старшого розряду, що відкидається. Якщо  $L$  – кількість неврахованих під час округлення розрядів за рівномірного закону розподілу ймовірностей округлення (що справедливо здебільшого, якщо  $n \geq 8$ ), то дисперсія похибки простого відсікання і симетричного округлення (уже за порівняно невеликих  $L$ ):

$$D_y = 2^{-2n} / 12 = \Delta_0^2 / 12.$$

Математичне сподівання інструментальної похибки округлення

$$M_y = [2^{-(n+L+1)}].$$

Похибки відсікання мають знак мінус для будь-яких арифметичних операцій над числами у прямому та додатковому кодах, тому в разі значної кількості послідовних арифметичних операцій похибки можуть нагромаджуватись і перевищувати допустимий рівень. Особливо важливо оцінювати цю похибку у разі розрядної мережі мікропроцесорної системи, близької до розрядності аналого-цифрового перетворення.

У засобах вимірювання, якими керує МП, суттєву роль відіграють часові затримки запуску АЦП порівняно з потрібним графіком вимірювань. Ці затримки значною мірою визначаються затратами процесорного часу на обробку переривань, керування, запам'ятовування, виконання інтерфейсних функцій. З огляду на це під час метрологічних випробувань мікропроцесорних засобів вимірювання, коли похибка датування відліку залежить від стану вимірювальних модулів і програмних драйверів, потрібно передбачати експериментальне визначення характеристик цієї похибки.

Вплив похибки датування відліку на загальну похибку мікропроцесорного засобу вимірювання  $\Delta$  залежить від швидкості змінювання вхідного сигналу  $dx / dt$ :

$$\Delta = \Delta_{\text{м.з.в}} \frac{dx}{dt} \delta_t,$$

де  $\Delta_{\text{м.з.в}}$  – абсолютна похибка мікропроцесорного засобу вимірювання;  $\delta_t$  – похибка датування відліків.

Похибку  $\delta_t$  можна визначати як різницю між астрономічним і реальним часом виконання вимірювань або як міру відхилення інтервалу між послідовними опитуваннями АЦП від заданого інтервалу, який потрібно підтримувати постійним. Організуючи опитування АЦП, їх швидкість вибирають такою, щоб у межах допустимих похибок можна було між двома послідовними вимірюваннями використати лінійну інтерполяцію ( $dx/dt = \text{const}$ ). Однак під час дослідження швидких процесів зазвичай задовольнити цю умову неможливо, що призводить до виникнення динамічної похибки.

#### 4.2.3. Автоматичні цифрові вимірювальні прилади

**Загальні відомості.** Із розвитком науки і техніки, інтенсифікацією виробничих процесів, упровадженням автоматичних систем керування технологічними процесами постають нові завдання щодо електричних вимірювань. Основні з них такі: підвищення точності, швидкодії та чутливості приладів для вимірювання як стабільних, так і змінних у часі величин; повна автоматизація процесу вимірювання, одержання результатів у вигляді кодів, призначених для введення в ЕОМ або в цифрові автоматичні системи керування. Ці завдання найчастіше успішно виконують за допомогою цифрових засобів вимірювання, що видають результат вимірювання у цифровій формі, тобто у вигляді числа або цифрового коду.

Цифрові засоби вимірювання поділяють на ЦВП і АЦП.

*Цифровим вимірювальним приладом* називають засіб вимірювання, у якому безперервна вимірювана величина автоматично перетворюється в дискретну, піддається цифровому кодуванню, а результат вимірювання подається у цифровій формі, зручній для візуального відліку. Для цього ЦВП оснащені відліковими пристроями<sup>8</sup>.

---

<sup>8</sup> *Цифрові відлікові пристрої* служать для подання результатів вимірювання у вигляді звичайних, зручних для зчитування оператором десяткових цифр. У цих пристроях застосовують кілька типів цифрових індикаторів, зокрема газорозрядні, світлодіодні та рідиннокристалічні.

*Газорозрядні індикатори* мають набір дротяних катодів, виконаних у формі десяти арабських цифр, і загальний сітчастий анод. Якщо напруга подається на анод і якийсь із катодів, то між ними виникає тліючий розряд у вигляді висвітленої відповідної цифри. Головна вада цих індикаторів – погана сумісність із низьковольтними інтегральними мікросхемами через високу робочу напругу (170...200 В).

*Світлодіодні індикатори* використовують напівпровідникові інжекційні світловипромінювальні діоди, що випромінюють у видимій частині спектра. Вони мають високу яскравість, більшу довговічність, низькі робочі напруги (кілька вольтів), однак невеликі розміри обмежують їх застосування (у сучасних приладах застосовують досить широко).

У *рідиннокристалічних сегментних індикаторах* використовують властивості деяких органічних речовин, названих рідкими кристалами, змінювати коефіцієнт заломлення під дією підведеної напруги. Конструктивно індикатори виконані у вигляді конденсатора, обкладками якого є струмопровідні електроди, нанесені у вигляді прозорих плівок на дві скляні пластинки. Тонкий шар рідкого кристала розміщено між цими пластинками. Індикатори не випромінюють власної енергії, вони працюють у відбитому світлі, використовуючи контраст між ділянками із прикладеною напругою й тлом. Вони дуже економічні, але мають невисоку яскравість, а контрастність зображення залежить від зовнішнього засвічення.

*Аналого-цифровий перетворювач* не має відлікового пристрою, а вимірювальна величина видається на його виході у вигляді цифрового коду. Цей перетворювач зазвичай входить до складу ЦВП та вимірювально-інформаційних або керувальних систем. Цифровий вимірювальний прилад виконують у вигляді переносних і панельних приладів для встановлення на стандартних стійках. Особливістю ЦВП є дискретність за часом і за рівнем результатів вимірювання. Цифрове значення аналогової вимірюваної величини утворюється в процесі квантування та числового кодування, виконаного ЦВП.

Квантуванням за рівнем називають процес перетворення безперервної величини в ряд однакових за значенням дискретних величин (ступенів квантування), який представляє всю вимірювану величину. При цьому номінальному значенню вимірюваної величини  $X_n$  відповідає  $N_n$  ступенів квантування. Прикладом може бути декада резисторів, опори яких дискретні, віддалені один від одного на ступінь квантування. Отже, під цифровим кодуванням розуміють процес одержання кількості ступенів квантування, що відповідають вимірюваній величині, у прийнятій системі числення. Кількість дискретних рівнів ЦВП залежить від кількості розрядів відлікового пристрою та значення ступеня квантування, що може бути змінним для багатодіапазонних приладів. Дискретність у часі ЦВП пояснюється тим, що виконання процесу перетворення *аналог – код – відлік* потребує певного часу.

Цифрові прилади мають низку переваг, основні з яких: *а)* швидкодія, що досягає десятків мільйонів вимірювань за секунду; *б)* висока точність, що наближується до точності цифрових пристроїв ручного зрівноважування; *в)* відсутність суб'єктивних складових похибок відліку, що обмежують точність аналогових пристроїв; *г)* немає потреби у висококваліфікованих операторах; *д)* наявність кодованого виходу в ЦВП, що можна використовувати для зв'язку з ЕОМ, реєстрації та керування; *е)* можливість автоматичного введення поправки для запобігання систематичним похибкам; *ж)* можливість зменшення випадкових похибок.

Поряд із цим існують і певні вади, властиві ЦВП: *а)* незручність порівнянь показання цифрового приладу із заданим граничним значенням вимірюваної величини; *б)* потреба у високій лінійності перетворювачів; *в)* складність установа та висока вартість. Застосування інтегральних схем знижує вартість приладів і підвищує їх надійність.

Аналого-цифрові перетворювачі застосовують у вимірювально-інформаційних системах для автоматизації досліджень, в АСК технологічними процесами складних об'єктів керування, у системах телевимірювання з кодовою формою переданого сигналу, в автоматичних системах для вивірення вимірювальних приладів.

Цифрові вимірювальні прилади можна класифікувати за такими ознаками.

1. За призначенням – широко застосовуваними видами цифрових приладів є вольтметри постійного струму, цифрові омметри, вимірювачі

відношення напруг, частотоміри та фазометри. Напругу змінного струму вимірюють спочатку точним перетворювачем змінної напруги в постійну, а потім цифровим вольтметром постійного струму.

2. За засобом перетворення вимірюваної величини в код ЦВП – прилади прямого перетворення та прилади зрівноваження.

*Цифрові прилади прямого перетворення* вимірювальної величини у код поділяють на прилади безперервної та циклічної дії. До перших належать прилади з кодувальними перетворювачами *кут – код*, у яких вимірювана електрична величина вимірювальним механізмом перетворюється у кут повороту рухомої частини приладу, а кут повороту просторовим перетворювачем кодування – у код.

Прилади прямого перетворення циклічної дії перетворюють вимірювану величину в частоту, а інтервал часу – в кількість імпульсів або кут, який потім перетворюється в код.

*Цифрові прилади зрівноваження* вимірювану величину  $X$  зрівнюють з відомою компенсувальною величиною  $X_k$ , яка змінюється у часі. Процес порівняння триває до моменту зрівноваження величин  $X$  і  $X_k$ , що фіксується пристроєм порівняння і підсилювачем некомпенсації.

Цифрові прилади зрівноваження поділяють на прилади відстежувального та прилади розгортального зрівноваження. Компенсувальна величина приладів відстежувального зрівноваження  $X_k$  за сигналом підсилювача некомпенсації змінюється реверсивно у бік зменшення або збільшення (якщо вимірювальна величина змінюється на значення, більше від половини ступеня квантування).

Цифрові прилади розгортального зрівноваження компенсувальну величину збільшують або зменшують повторюваними циклами. Кожне нове значення вимірюваної величини видається після завершення циклу.

Характер зміни  $X_k$  приладів зрівноваження може бути лінійним, рівномірно-східчастим, нерівномірно-східчастим. Цифрові вимірювальні прилади розгортального зрівноваження з нерівномірно-східчастою зміною  $X_k$  називають приладами порозрядного зрівноважування.

3. За принципом роботи ЦВП можна умовно поділити на часоімпульсні, частотно-імпульсні та кодоімпульсні.

*Часоімпульсні ЦВП* вимірювану величину перетворюють у пропорційний інтервал часу, що вимірюється цифровим квантувачем інтервалів часу. Часоімпульсні ЦВП бувають двох модифікацій: ті, що реагують на миттєве значення вимірюваної величини  $x$ , і ті, що вимірюють середнє значення за певний проміжок часу – інтегрувальні ЦВП.

Для *частотно-імпульсних ЦВП* характерно, щоб вимірювана величина  $x$  перетворювалася в пропорційну її значенню частоту виникнення імпульсів, яку вимірюють цифровим частотоміром. Цей принцип здебільшого використовують у комбінованих приладах.

Сутність принципу дії *кодоімпульсних ЦВП* полягає в тому, що вимірювана величина  $x$  послідовно немовби зрівнюється аналогічною їй фізичною величиною.

Залежно від типу використаних елементів ЦВП поділяють на електромеханічні та електронні. Перемикальні пристрої, що входять до вимірювального кола електромеханічних ЦВП, побудовані на контактних елементах (реле, крокові шукачі, крокові двигуни тощо) і мають малу швидкодію (не вище 3...4 вимірювань за секунду). В електронних ЦВП використовують електронні елементи (діоди, транзистори, інтегральні схеми тощо), швидкодія яких може досягати  $10^6$  і більше вимірювань за секунду.

Найпоширеніші види вимірювальних приладів, що містять МП, – цифрові вольтметри і частотоміри. Для сучасного етапу розвитку «інтелектуальних» приладів характерна корінна зміна принципів їх побудови: органічною частиною таких засобів вимірювання стала мікропроцесорна система.

**Метрологічні характеристики ЦВП.** Для ЦВП граничнодопустиме значення відносної похибки встановлюють за формулою (див. Кн. 1, п. 2.2.5)

$$\delta(X_i) = \gamma_v + \gamma_n(|X_v / X_i| - 1),$$

де  $X_v$  – верхня границя діапазону вимірювань;  $X_i$  – значення вимірюваної величини;  $\gamma_n = \gamma_{ад}$  – зведена похибка на початку діапазону вимірювань, тобто в точці нижньої границі вимірювань ( $X_i = X_n$ );  $\gamma_v = \gamma_{ад} + \delta_m$  – сумарна зведена похибка в кінці діапазону вимірювань;  $\delta_m$  – відносна мультиплікативна похибка.

Крім того, для ЦВП нормують ступінь квантування, коди вихідних сигналів та інші характеристики. Додаткові похибки ЦВП нормують або в частках від основної похибки, або у вигляді функції впливу.

Відповідно до порівняння цифрових та аналогових приладів за точністю (умовно) і швидкістю (для середньої та високої точностей) більшу швидкість мають цифрові прилади (динамічні характеристики аналогових приладів характеризуються часом встановлення показань, а ЦВП – швидкістю, тобто часом вимірювання). Зі збільшенням швидкості підвищується точність аналогових приладів. Швидкість більшості цифрових приладів досить висока, але їх точність за високої швидкості стрімко зменшується. Це зумовлено тим, що підвищити швидкість після використання найбільш швидкодійних ключів можна лише за зменшення кількості ступенів квантування, що призводить до зниження точності. Зі збільшенням швидкості точність аналогових приладів також знижується, але повільніше, ніж цифрових.

**Прилади подвійного інтегрування.** Найпоширеніші і найбільш точні ЦВП – часоімпульсні прилади, що вимірюють середнє значення вимірюваної величини (прилади подвійного інтегрування). Ці прилади реалізують метод компенсації похибки за знаком, що дає змогу автоматично усунути вплив адитивної складової похибки вимірювання.

Суть цього методу компенсації похибки за знаком така. Якщо на вхід якого-небудь вимірювального перетворювача подати сигнал вимірюваної інформації  $X$ , то, пройшовши через перетворювач, він перетвориться в

сигнал  $Y = f(X)$  з деякою похибкою  $\Delta Y$ . Якщо ж цей сигнал  $X$  спочатку додати до певного сигналу зсуву  $X_{зс}$ , що перевищує максимально можливе значення вхідного сигналу  $X_{\max}$ , а потім відняти його від цього сигналу, то після подачі по чергово цих нових сигналів на вхід вимірювального перетворювача на його виході теж сформулюються два нові вихідні сигнали  $Y_1 = f(X_{зс} + X)$  і  $Y_2 = f(X_{зс} - X)$  з деякою похибкою  $\Delta Y$ .

Ця похибка матиме однаковий знак в обох випадках, оскільки вхідні сигнали  $(X_{зсв} + X)$  і  $(X_{зсв} - X)$  також одного знака. За умови, що функція перетворення  $Y = f(X)$  лінійна, отримані сигнали  $Y_1$  і  $Y_2$  набудуть такого вигляду:

$$Y_1 = kX_{зс} + kX + \Delta Y;$$

$$Y_2 = kX_{зс} - kX + \Delta Y.$$

Віднявши від першого вихідного сигналу другий та розділивши отриману різницю на два, отримаємо:

$$Y_{\text{вих}} = (Y_1 - Y_2) / 2 = (kX_{зс} + kX + \Delta Y - kX_{зс} + kX - \Delta Y) / 2 = kX.$$

Таким чином, на виході пристрою буде сигнал, який вже не містить  $\Delta Y$ :

$$Y_{\text{вих}} = kX.$$

На практиці цей метод можна реалізувати так. Якщо на вхід інтегратора, що містить інтегровальний конденсатор, подати вхідний сигнал, який включає спочатку різницю між зсувною напругою  $U_{зс}$  і вхідною напругою  $U_x$ , а потім – суму цих напруг, то інтегратор зарядиться за деякий постійний проміжок часу  $\Delta T$  спочатку до напруги  $(U_{зс} + U_x)k + \Delta U$ , а потім за такий самий проміжок часу  $\Delta T$  – до напруги  $(U_{зс} - U_x)k + \Delta U$ .

Подача на вхід інтегратора опорної напруги  $U_{оп}$  протилежного знака спричинює розрядження інтегратора щораз після його зарядження до певного стану. А визначаючи за допомогою імпульсів каліброваної тривалості проміжки часу, за які інтегратор розрядиться до нульового стану, можна перетворити  $(U_{зс} + U_x)k + \Delta U$  та  $(U_{зс} - U_x)k + \Delta U$  у відповідні кількості імпульсів  $N_{зс} + N_x + \Delta N$  і  $N_{зс} - N_x + \Delta N$ . Порахувавши отриману кількість імпульсів на реверсивному лічильнику спочатку у від'ємний бік, а відтак – у додатний, одержують на виході лічильника у чистому вигляді сигнал  $2N_x$ , що містить кількість імпульсів  $N_x$ , яка залежить від вхідного сигналу  $U_x$ . Розділивши далі цей сигнал  $2N_x$  навпіл, отримують  $N_x$ , що відображає вхідний сигнал  $U_x$  без адитивної складової похибки.

Функціональну блок-схему пристрою можна подати як на рис. 4.3. За командою  $T_{кер1}$  блок керування по черзі подає вхідну напругу  $U_x$  на плюсовий і мінусовий входи суматора, на третій вхід якого подається напруга зсуву  $U_{зс}$ . Складаючись спочатку з від'ємним, а потім із додатним значеннями вхідного сигналу, ця напруга на виході суматора перетворюється в сигнал, що містить спочатку від'ємне значення вхідного сигналу, а потім – додатне (оскільки зсувну напругу  $U_{зс}$  вибирають більшою за максимально можливе значення вхідного сигналу, то похибка перетворення  $\Delta U$  в обох випадках буде одного знака).



Надходячи далі по черзі на інтегратор, вони заряджають його до сумарної напруги

$$U_c = k(U_{зс} + U_x) + k\Delta U \text{ і } U_c = k(U_{зс} - U_x) + k\Delta U.$$

За командою того самого блока керування (через розрядження інтегратора за допомогою тригера керування  $T_{кер2}$  до нульового стану та щоразу підключання опорної напруги протилежного знака  $U_{оп}$ ) входні сигнали на інтеграторі перетворюються у відрізки часу  $t_1$  і  $t_2$ , які залежать від додатного та від'ємного значень входного сигналу  $U_x$ . За допомогою спеціальної схеми, що містить нуль-індикатор обнулення інтегратора (нуль-орган) і лічильник-перетворювач, ці два проміжки часу ( $t_1$  і  $t_2$ ) перетворюються в дві послідовності імпульсів  $N_{зс} + N_x + \Delta N$  і  $N_{зс} - N_x + \Delta N$ , що містять корисний сигнал  $N_x$  з протилежними знаками і сигнал похибки  $\Delta N$  одного знака. Стабільність проходження імпульсів забезпечується генератором імпульсів каліброваної тривалості.

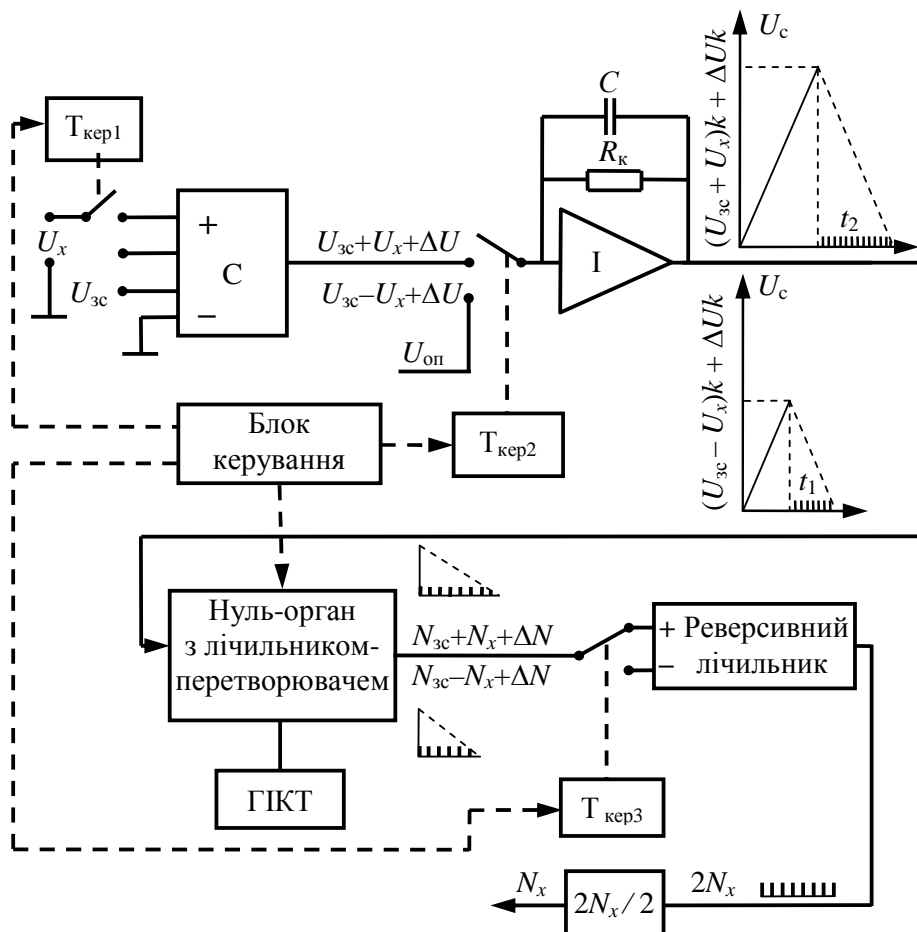


Рис. 4.3. Спрощена функціональна схема приладу подвійного інтегрування: С – суматор; І – інтегратор; ГІКТ – генератор імпульсів каліброваної тривалості

Надходячи далі на додатний і від'ємний входи реверсивного лічильника, комутованого командами  $T_{кер3}$  блока керування, ці імпульси перетворюються в послідовність імпульсів  $2N_x$ , яка містить подвійний корисний сигнал. Поділивши далі на два ці послідовності імпульсів, одержують вимірюваний сигнал  $N_x$ , позбавлений адитивної складової похибки  $\Delta N$ .

**Мікропроцесорні цифрові прилади (технологічні індикатори).**  
 Цифровий індикатор, функціональну схему якого показано на рис. 4.5, призначений для вимірювання значення одного входного технологічного параметра, обробки та перетворення його в двох різних шкалах. Тобто, сигнал аналогового входу  $A_{\text{вх}}$  можна подавати на входи першого і другого блоків нормалізації та масштабування сигналу, з виходу яких отримують сигнали  $X_1$ ,  $X_2$  з різними калібруваннями, типами шкал, параметрами лінеаризації тощо. Цю функцію можна використовувати, наприклад, для вимірювання рівня й об'єму або витрати та кількості речовини за однією входною величиною (рівнем або витратою відповідно).

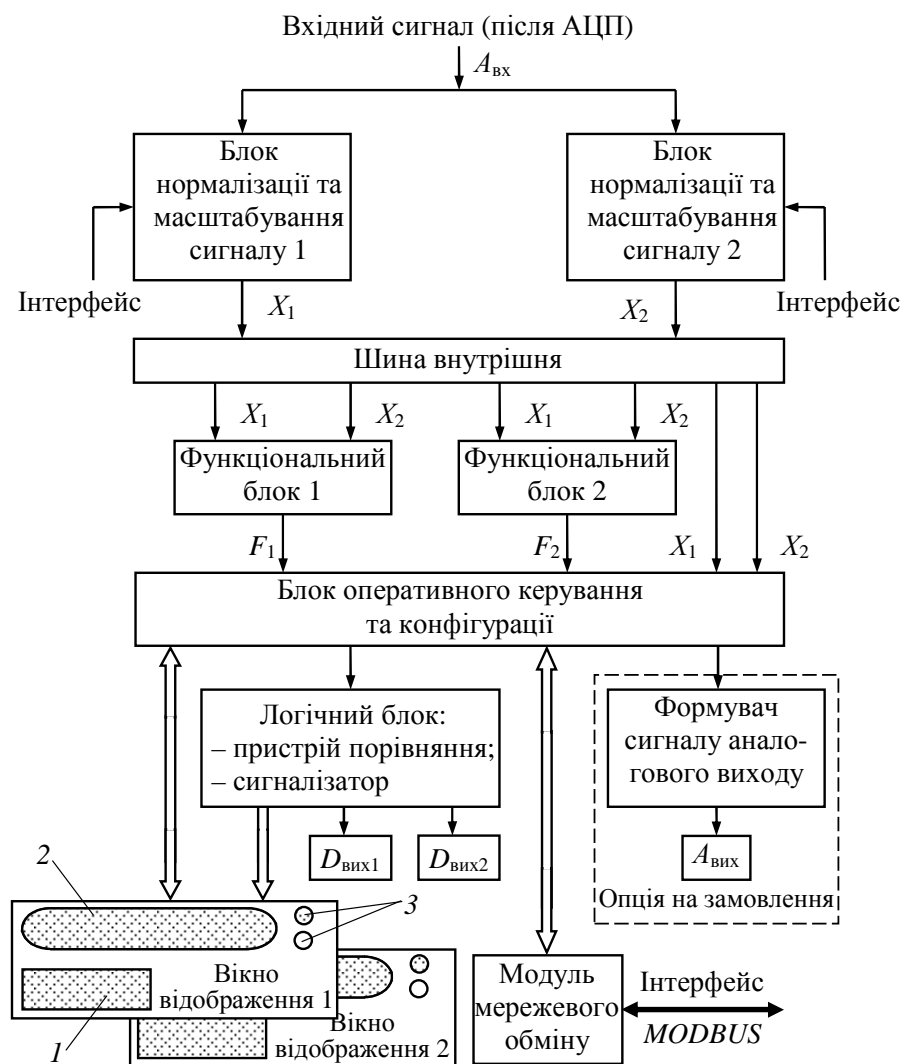


Рис. 4.5. Функціональна схема цифрового приладу (індикатора):  
 $A_{\text{вх}}$  – аналоговий вхід;  $X$  – контрольований параметр;  $A_{\text{вих}}$  – аналоговий вихід;  
 $D_{\text{вих1}}$ ,  $D_{\text{вих2}}$  – дискретні виходи;  $F_1$ ,  $F_2$  – виходи відповідних функціональних блоків;  
 1 – цифровий дисплей; 2 – лінійний індикатор; 3 – світлодіодні індикатори

В індикаторах апаратно можна підключити один аналоговий входний сигнал  $A_{\text{вх}}$  (це – різні уніфіковані сигнали струму: 0...5, 0...20, 4...20 мА та напруги: 0...75 і 0...200 мВ, 0...2 та 0...10 В, а також вихідні сигнали основних

типів ТО та ТП), який може бути прийнятий першим і другим функціональними блоками нормалізації та масштабування. Після обробки вхідного сигналу  $A_{\text{вх}}$  блоками нормалізації та масштабування формуються значення вимірюваної величини  $X_1$  і  $X_2$  в технічних одиницях (граничнодопустима основна зведена похибка вимірювання вхідних параметрів не перевищує 0,2 %). Це значення може відображатися на дисплеях передньої панелі, подаватися на аналоговий вихід з прямим і зворотним напрямком, подаватися на компаратор, з нього – на дискретний вихід, а також може оброблятися одним із функціональних блоків відповідно до вибраної користувачем математичної функції. В постійному запам'ятовувальному пристрої розміщено велику кількість функцій для розв'язання задач контролю.

На кожен функціональний блок подається значення перетвореної вимірюваної величини  $X_1$  чи  $X_2$  (або значення, переданого по інтерфейсу). Кожне значення множиться на відповідний коефіцієнт, заданий користувачем, потім ці значення подаються на вибраний математичний блок, де обробляються за заданим алгоритмом. На блок інтегрування та диференціювання (визначення похідної) подається значення тільки однієї вимірюваної величини. Вихідна величина інтегрального блока (блок працює як лічильник) має одиниці виміру «техн. од./год», а блока похідної (швидкість зміни параметра) – «техн. од./хв».

Внутрішня програма індикаторів функціонує з постійним тимчасовим циклом. На початку кожного циклу внутрішньої робочої програми прочитується значення аналогового входу  $A_{\text{вх}}$ , відбувається прочитування та приймання команд і даних з послідовного інтерфейсу. За допомогою цих вхідних сигналів здійснюються – відповідно до запрограмованих функцій і визначених користувачем параметрів конфігурації – всі розрахунки. Після цього здійснюється виведення інформації на аналоговий і дискретні виходи, індикаційні елементи вікна відображення, а також фіксація обчислених величин для режиму передачі послідовного інтерфейсу.

Логічний пристрій реалізує такі функції:

- компаратор (пристрій порівняння);
- сигналізатор;
- двопозиційний регулятор.

Налагодження логічного пристрою проводяться на рівні налагоджень дискретних виходів. У відповідному пункті меню обирається джерело аналогового сигналу для керування дискретним виходом, наприклад, джерелом керування першим дискретним виходом  $D_{\text{вих1}}$  може бути вибрана вимірювана величина, оброблена другим функціональним блоком нормалізації і масштабування ( $X_2$ ), для керування другим дискретним виходом  $D_{\text{вих2}}$  – вихід першого функціонального блока ( $X_1$ ). Окремою опцією здійснюється формування сигналу аналогового виходу  $A_{\text{вих}}$ .

У меню вибирається ще й логіка роботи логічного пристрою. Керувати логічним пристроєм і сигналізацією можна також через інтерфейс. Вихідний сигнал логічного пристрою може бути статичним або імпульсним (динамічним) із заданою довжиною імпульсу.

Контроль виходу за межі уставок (завдань) сигналізації проводиться для кожного значення вимірюваної величини  $X_1$  і  $X_2$ , а також – окремо – для виходів  $F_1$  і  $F_2$  функціональних блоків. Після цього здійснюється виведення інформації на аналоговий і дискретні виходи, індикаційні елементи вікна відображення, що складається з цифрового дисплея, лінійного індикатора, індикаторів дискретних виходів і сигналізації, а також фіксація обчислених величин для режиму передачі послідовного інтерфейсу.

Технологічні мікропроцесорні індикатори керовані сучасним високоінтегрованим мікроконтролером, виготовленим за високошвидкісною КМОП-технологією<sup>9</sup> з низьким енергоспоживанням.

**Цифрові програмовані багатоканальні вимірювальні прилади (реєстратори даних).** Застосування у вимірювальній техніці МП і мікро-ЕОМ зумовило виникнення нового класу цифрових програмованих багатоканальних вимірювальних приладів; їх ще називають *логерами* (реєстраторами даних). Узагальнену структурну схему такого приладу показано на рис. 4.6.

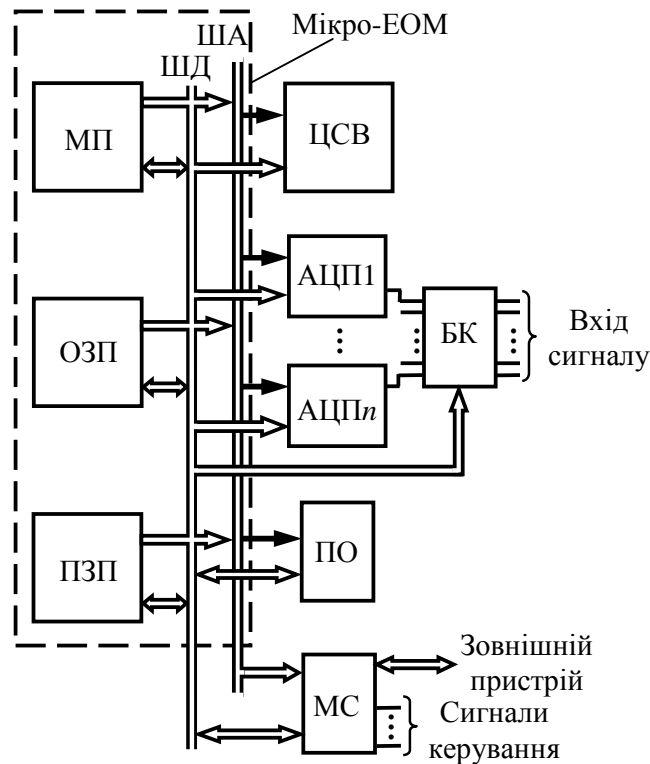


Рис. 4.6. Узагальнена структурна схема реєстратора даних:  
 ЦСВІ – цифрова система відображення інформації; БК – блок комутатора;  
 ПО – пульт оператора; МС – модуль сполучення

<sup>9</sup> КМОП (комплементарна логіка на транзисторах метал-оксид-напівпровідник; англ. *CMOS, Complementary-symmetry/metal-oxide semiconductor*) – технологія побудови електронних схем. У технології КМОП використовують польові транзистори з ізольованим затвором і каналами різної провідності. Прикметна особливість схем КМОП порівняно з біполярними технологіями (ТТЛ, ЕСЛ тощо) – дуже мале енергоспоживання в статичному режимі (в більшості випадків можна вважати, що енергія споживається лише під час перемикання станів). Відмітною особливістю структури КМОП порівняно з іншими МОП-структурами (*N*-МОП, *P*-МОП) є наявність як *n*-, так і *p*-каналних польових транзисторів; як наслідок, КМОП-схеми мають вищу швидкодію і менше енергоспоживання.

Як видно, типовий логер побудовано відповідно до концепції шинної організації за блоково-модульним принципом. Тут усі елементи вимірювальної системи розглядаються як зовнішні пристрої для МП або мікро-ЕОМ. Логери можуть містити до 100 вимірювальних каналів, опитуваних синхронно або асинхронно, причому частота опитування може змінюватись у широких межах. Убудований МП керує роботою приладу відповідно до заданої програми. Програма керування більшої сучасних логерів зберігається на дисках або стрічках.

Останнім часом значного поширення набули ЦВП, побудовані на базі персональних ЕОМ, обчислювальні можливості та й сама архітектура яких виявилися достатньо пристосованими для цього. Виникла «надлишкова» обчислювальна потужність і добре розвинені структури персональних комп'ютерів дали змогу раціонально поєднати апаратні та програмні засоби в процесі створення нових ЦВП.

#### **4.3. ЗАСТОСУВАННЯ ЦИФРОВОЇ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ У ЗАСОБАХ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ**

Під час виконання технологічних вимірювань інколи виникає потреба в різних обчислювальних операціях, пов'язаних з визначенням значень вимірюваних величин і похибок вимірювань. Окрім того, для раціональної організації процесу автоматичного контролю технологічних параметрів потрібно виконувати різні логічні операції. Ці завдання вирішують за допомогою засобів обчислювальної техніки – обчислювальних пристроїв. Обчислювальні пристрої поділяють на пристрої безупинної (аналогові) і пристрої дискретної (цифрові) дії.

В аналогових обчислювальних пристроях значення величин, над якими виконуються математичні операції, змінюються безупинно. Вони зображаються в певному масштабі у вигляді інших фізичних величин, наприклад, напруги, струму, тиску стиснутого повітря тощо. Результат виконання аналоговими пристроями математичних операцій з'являється одразу після введення вхідних даних. Аналогові обчислювальні пристрої вирізняються простотою і порівняно невисокою вартістю. Їх уже давно і широко застосовують у засобах технологічних вимірювань для обробки сигналів вимірювальної інформації, однак через обмежену точність (похибка не менша за  $\pm 0,1 \dots 0,5$  %) їх застосування виявляється доцільним тільки для реалізації порівняно простих алгоритмів.

У цифрових обчислювальних пристроях значення величин, над якими виконуються математичні операції, набувають вигляду набору цифр. Кожна цифра, що відповідає визначеному розряду числа, встановлюється на окремому цифровому елементі: тригері, рахунковому колесі тощо. У процесі виконання математичних операцій значення вхідних даних не змінюються. Нові вхідні дані вводяться в цифровий обчислювальний пристрій

лише через певний час, потрібний для виконання обчислень. Таким чином, цифрові обчислювальні пристрої працюють переривчасто в часі (дискретно). Цифрові обчислювальні пристрої вирізняються практично необмеженою точністю, великими логічними можливостями і значною швидкістю.

Можна виокремити два види цифрових обчислювальних пристроїв як засоби вимірювань: пристрої з незмінюваною програмою обробки інформації та пристрої зі змінюваною програмою обробки інформації.

Пристрої з незмінюваною програмою обробки інформації мають незмінну структуру, що визначається прийнятою програмою обробки інформації, складеною відповідно до реалізовуваних функцій. Будь-яке змінювання реалізовуваної функції потребує змінювання структури обчислювального пристрою. Такі цифрові обчислювальні пристрої, як і аналогові, мають вузьку спеціалізацію.

Цього недоліку позбавлені цифрові обчислювальні пристрої зі змінюваною програмою обробки інформації, які дозволяють розв'язувати будь-які обчислювальні задачі. Ці пристрої являють собою цифрові електронні обчислювальні машини – ЕОМ, міні-ЕОМ, мікро-ЕОМ, МП.

#### **4.3.1. Уведення вимірювальної інформації про технологічні параметри в пристрої цифрової обчислювальної техніки. «Розумні» датчики**

Сучасні засоби вимірювань технологічних параметрів мають вихідні сигнали у вигляді постійного струму, частоти чи тиску, тобто є аналоговими. Для введення цих сигналів у засоби ЦОТ потрібно використовувати відповідні перетворювальні (узгоджувальні) пристрої. Загальне вирішуване при цьому завдання полягає в перетворенні сигналів ПВП в електричний кодовий сигнал, який сприймається засобами обчислювальної техніки. Найбільш типові структурні схеми пристроїв, використовуваних для узгодженого функціонування засобів вимірювань технологічних параметрів і засобів обчислювальної техніки, показано на рис. 4.7.

Електричний сигнал постійного струму  $I$  перетворюється у кодовий за допомогою АЦП (рис. 4.7, *а, б*), а сигнал частоти  $f$  – за допомогою частотно-цифрового перетворювача (рис. 4.7, *в, г*).

Якщо ці перетворювачі використовують для перетворення сигналів декількох ПВП (наприклад, ПВП1–ПВП $n$ ), то сигнали по черзі підводяться до АЦП (рис. 4.7, *б*) через електричний комутатор.

Для перетворення сигналів тиску  $p$  стиснутого повітря, вироблених пневматичними ПВП, зазвичай використовують попереднє перетворення тиску в електричний сигнал постійного струму (рис. 4.7, *д, е, ж*) за допомогою пневмоелектричних перетворювачів. При цьому, якщо один пневмоелектричний перетворювач і один АЦП застосовуються для перетворення сигналів декількох ПВП, то почергове підключення ПВП до пневмоелектричного перетворювача здійснюється за допомогою пневматичного комутатора

(рис. 4.7, е). Якщо ж для перетворення сигналу кожного пневматичного ПВП використовується індивідуальний пневмоелектричний перетворювач, то за допомогою електричного комутатора (рис. 4.7, ж) по черзі підключаються ПВП1–ПВП $n$  до АЦП.

Кодовий сигнал уводиться в засоби обчислювальної техніки за допомогою приладових інтерфейсів.

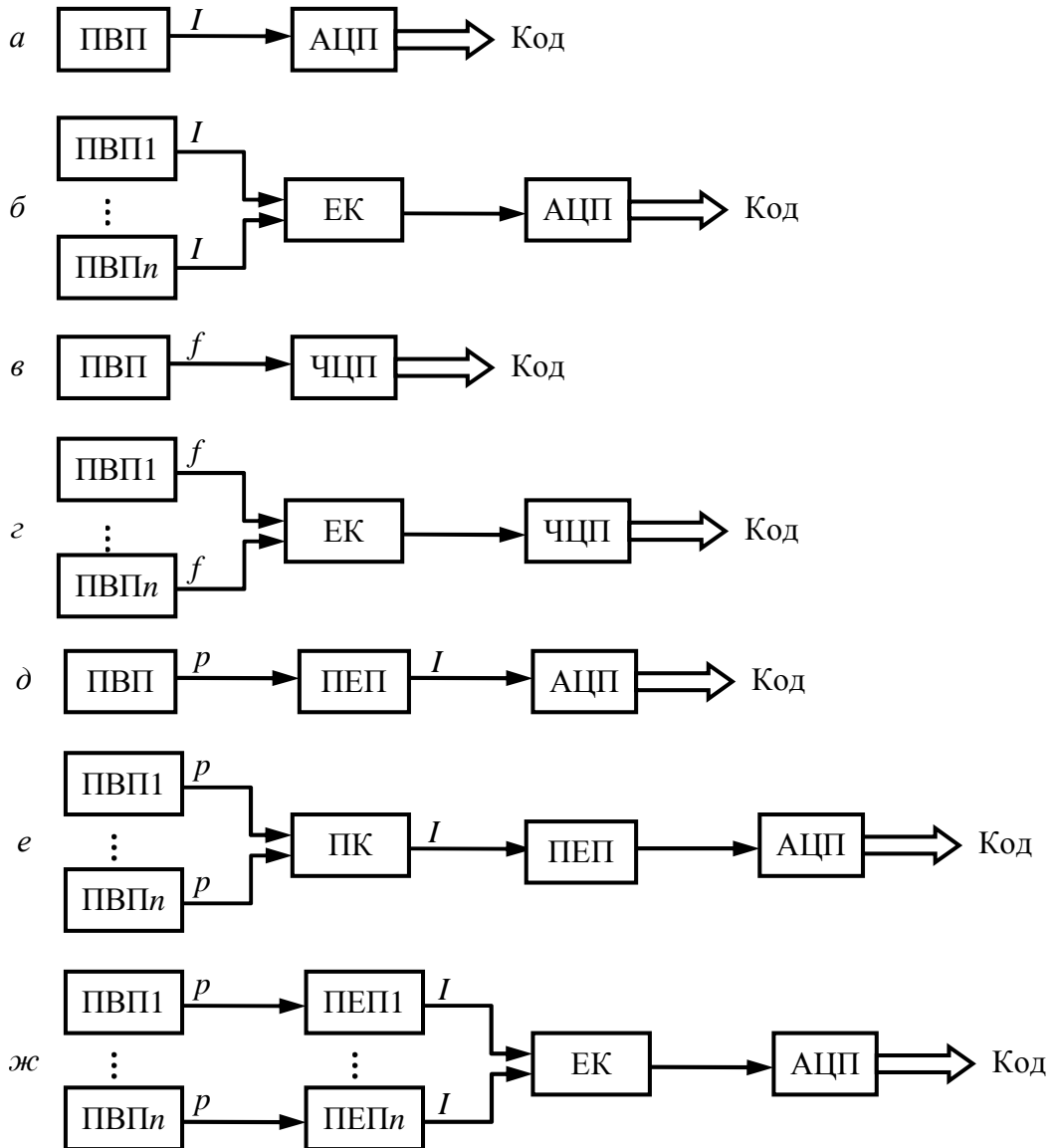


Рис. 4.7. Структурні схеми пристроїв узгодження:

ЕК – електричний комутатор; ЧЦП – частотно-цифровий перетворювач;  
 ПЕП – пневмоелектричний перетворювач; ПК – пневматичний комутатор

*Інтерфейс для засобів вимірювань (приладовий інтерфейс) призначено для обміну інформацією між засобами вимірювань, які мають вихідний сигнал у вигляді відповідного коду, і засобами ЦОТ.*

Останнім часом МП дедалі ширше оснащують не лише вторинні прилади та проміжні перетворювачі, а й первинні (їх прийнято називати

«розумними» датчиками). Обробка вимірювань безпосередньо в самому датчику дає змогу поліпшити його метрологічні та експлуатаційні характеристики. Загальну схему таких датчиків показано на рис. 4.8.

Роботою такого датчика керує мікропроцесор, це дозволяє міняти рівні збудження так, що перемикання між діапазонами вимірювання відбувається автоматично. Крім того, можуть відстежуватися температура навколишнього середовища й інші параметри, а також проводиться корекція показань датчика з використанням аналогового підсилювача або даних, збережених в пам'яті мікропроцесора. Найцінніша можливість, що надається мікропроцесорною обробкою, – можливість отримання лінійного сигналу від нелінійного датчика за допомогою таблиці відповідності, що зберігається в пам'яті мікропроцесора.

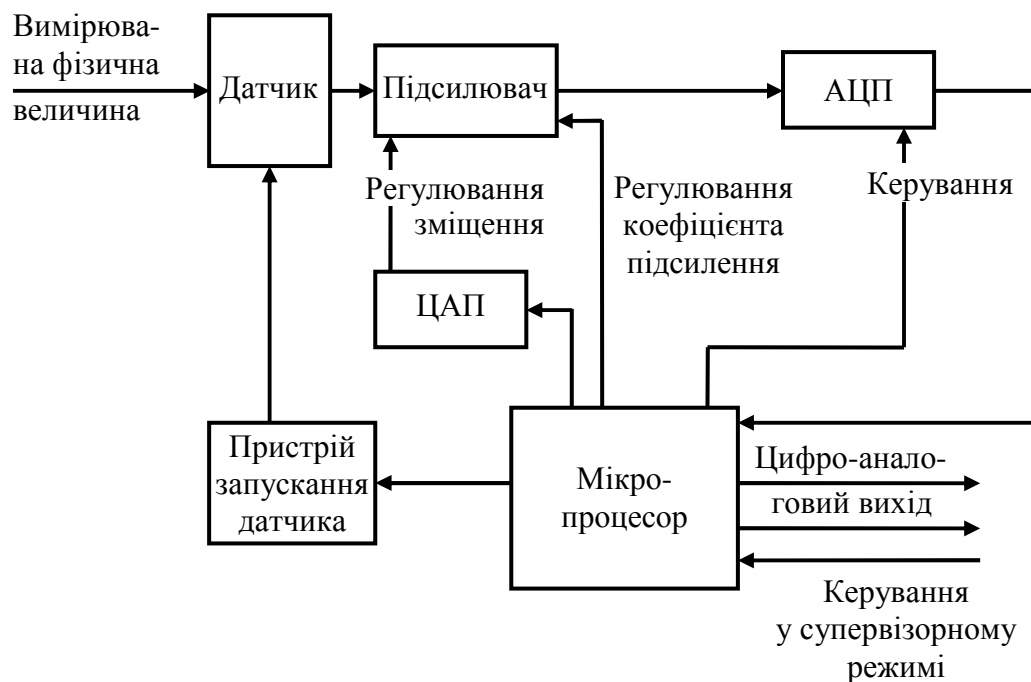


Рис. 4.8. Архітектура «розумного» датчика

Виходи «розумних» датчиків можуть бути аналоговими та цифровими. Аналогові системи для технологічних установок безперервного виробництва використовують так званий «живий» нуль (*live zeros*), коли нульове значення сигналу передається рівнем 4 мА (нагадаємо, у пневматичних пристроях це 0,02 МПа), щоб можна було відрізнити обрив кабелю (у пневматичних пристроях – пневмотрубки) від нульового значення сигналу. Стандартний робочий діапазон – 1...5 В або, для кращої завадостійкості на довгих відстанях, – 4...20 мА.

Цифрова телеметрія стає все більш поширеною. Вхід диспетчерського керування (стандарт протоколу для *Fieldbus*) дає змогу вводити «розумний» датчик до складу великої системи керування або застосовувати для локального керування. На додаток до сигналів тривоги, що свідчать про перевищення заданого значення сигналу, вбудована пам'ять може бути використана для



протоколювання вимірюваних даних з подальшою передачею протоколу на головний керувальний пристрій. На небезпечних виробництвах, де є ризик займання та вибуху, до електричного кола зазвичай вводять додатковий запобіжний пристрій, наприклад, на основі стабілітрона (діод Зенера).

До «розумних» датчиків можна віднести мікропроцесорні термоперетворювачі ТХАУ Метран-271МП, ТСМУ Метран-274МП, ТСПУ Метран-276МП (промислова група «Метран»), призначені для вимірювання температури рідких і газоподібних речовин, для яких матеріал захисних арматур корозієстійкий. Чутливий елемент і вбудований у головку термоперетворювача мікропроцесорний перетворювач перетворюють вимірювану температуру в уніфікований вихідний сигнал постійного струму, що дає змогу будувати АСК технологічних процесів без додаткових нормувальних перетворювачів.

Мікропроцесорні термоперетворювачі мають певні переваги над традиційними термоперетворювачами з уніфікованим вихідним сигналом:

- зниження витрат на проектування систем автоматизації;
- можливість змінювання діапазону перетворених температур і як результат – скорочення витрат на утримання парку запасних термоперетворювачів у 5–7 разів;
- оперативність проведення ремонтних і профілактичних робіт як результат безперервної самодіагностики;
- зменшення простоїв устаткування й підвищення надійності виробничого процесу;
- підвищення точності вимірювань (зведена похибка до  $\pm 0,15\%$ );
- наявність убудованого пристрою самокалібрування (якщо змінюється температура – аналого-цифрова вимірювальна схема автоматично самокалібрується, порівнюючи динамічні результати вимірювання з даними надзвичайно стабільних і точних внутрішніх еталонних елементів);
- сигналізація обриву чи короткого замикання первинного перетворювача (сенсора);
- можливість переналагоджування номінальної статичної характеристики у разі заміни ЧЕ на інший тип;
- мінімізація похибки вимірювання за рахунок температурної компенсації – додаткова похибка внаслідок впливу температури навколишнього середовища в 5–10 разів менша, ніж в аналогових перетворювачах з уніфікованим вихідним сигналом<sup>10</sup>;
- лінеаризація МП номінальної статичної характеристики сенсора для підвищення точності вимірювань;

---

<sup>10</sup> Мікропроцесорні ПВП випробовуються в діапазоні навколишніх температур від мінус 40 до плюс 70 °С. Випробувальна установка на базі комп'ютера вивчає, як мікропроцесорний перетворювач реагує на змінювання температури навколишнього повітря. Отримані дані записуються в пам'ять мікропроцесорного перетворювача. Крім того, мікропроцесорний перетворювач має вбудований ТО для вимірювання температури навколишнього повітря в реальних умовах експлуатації. Спираючись на виміряні та записані в пам'ять дані, МП вносить у вихідний сигнал термоперетворювача поправку на вплив температури навколишнього повітря.

- сигналізація виходу сигналу 4...20 мА (20...4 мА) за межі допустимого діапазону в процесі налагодження та виконання пусконаладжувальних робіт;
- можливість організації інверсного виходу 20...4 мА;
- наявність убудованого фільтра радіозавад.

Програмне забезпечення мікропроцесорних перетворювачів дає змогу виконувати: тестування та конфігурування термоперетворювача (за допомогою спеціального конфігуратора); діагностику ПВП, контура живлення, аналогового сигналу безпосередньо на місці встановлення термоперетворювача; уведення додаткової компенсації під час налагодження термоперетворювача під температуру навколишнього середовища.

#### **4.3.2. Застосування цифрової обчислювальної техніки у засобах для технологічних вимірювань**

Сучасний етап розвитку приладобудування характеризується широким використанням у складі засобів вимірювань обчислювальних пристроїв, побудованих на базі МП – мікропроцесорних систем (МПС). Застосуванням таких систем у вимірювальних пристроях досягають двох цілей: розширюють функції вимірювальних пристроїв і поліпшують їх характеристики.

Використання МПС у засобах електричних вимірювань дозволяє по-новому підійти до їх конструювання й алгоритмів функціонування, збільшити інформаційні можливості, підвищити точність, надійність і швидкодію.

У галузі технологічних вимірювань ведеться пошук раціональних рішень і розроблення вимірювальних пристроїв із вбудованими МПС. Загалом МПС у складі вимірювальних пристроїв дає змогу:

- обчислювати значення вимірюваної величини за заданим алгоритмом;
- виконувати статистичну обробку результатів вимірювання;
- аналізувати контрольований параметр (на максимум, мінімум тощо);
- коригувати статистичні характеристики (на підставі методів підвищення точності) засобів вимірювання;
- виконувати автоматичне самоградування та самоперевірку (зокрема, відновлення коефіцієнта перетворення і коригування нульового рівня сигналу);
- забезпечувати зв'язок із системою, до якої підключено вимірювальний пристрій;
- виконувати самодіагностику;
- керувати вимірюваннями;
- виконувати стабілізацію чи програмне регулювання режимних параметрів засобу вимірювання.

Однак, попри нові позитивні якості, МПС у складі вимірювальних пристроїв істотно ускладнюють ці пристрої. Як приклади розглянемо структурні схеми, використовувані для створення вимірювальних пристроїв технологічних параметрів (рис. 4.9).

Найбільшого поширення набула схема, яка реалізує метод допоміжних вимірювань (рис. 4.9, а). У роботі вимірювального пристрою, побудованого за такою схемою, використовується інформація про основний (вимірю-

ваний) параметр  $P_x$  та допоміжні  $P_{x1}$ ,  $P_{x2}$  параметри – чинники, що впливають (про навколишню температуру, атмосферний тиск тощо).

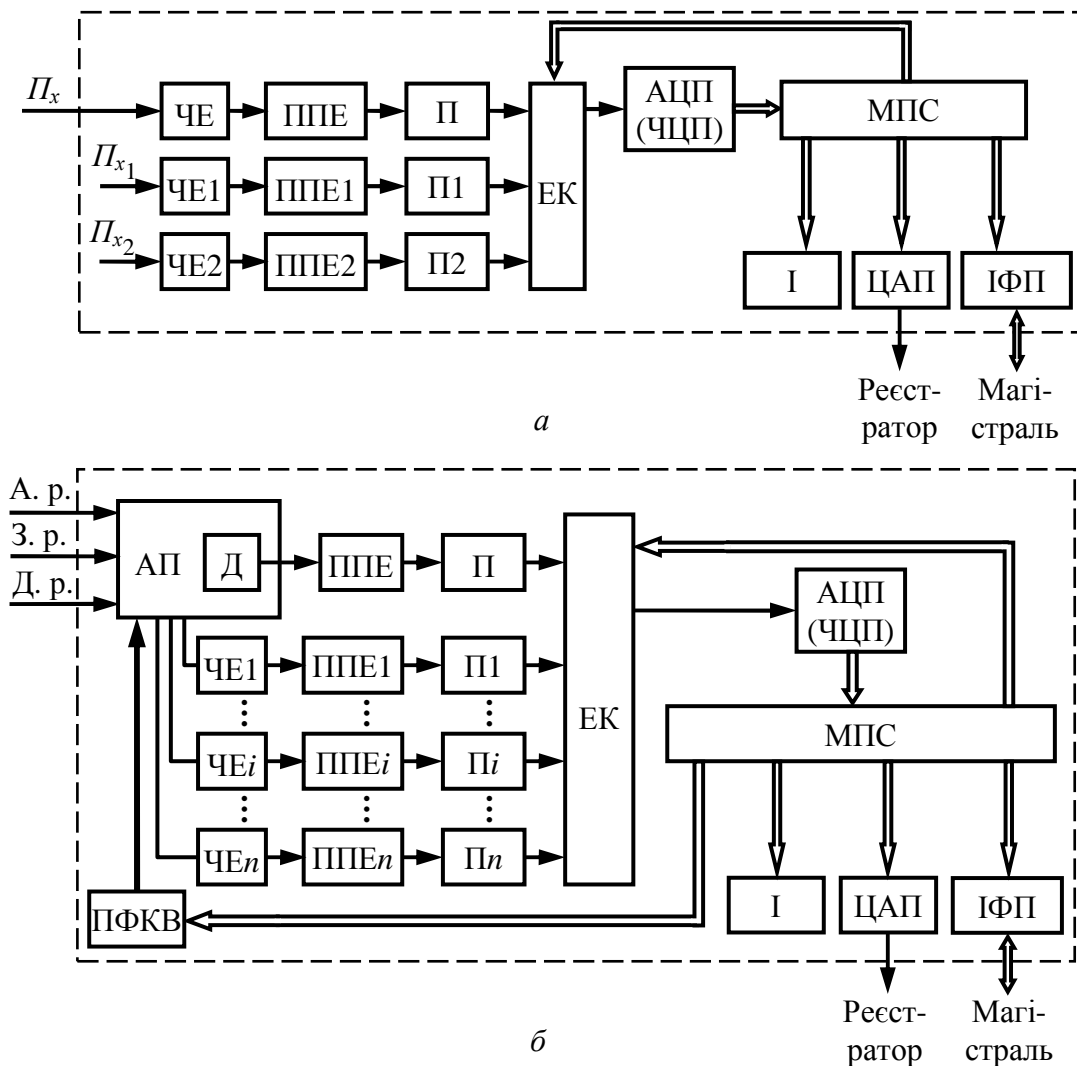


Рис. 4.9. Структурні схеми пристроїв із вбудованою МПС:

*a* – для вимірювання теплотехнічних параметрів;

*б* – для вимірювання якісних параметрів;

$P_x$  – основний (вимірюваний) параметр;  $P_{x1}$ ,  $P_{x2}$  – допоміжні параметри;

АП – аналітичний пристрій; Д – детектор; ЕК – електричний комутатор;

А. р. – аналізована речовина; З. р. і Д. р. – зразкова та допоміжна речовини;

І – індикатор цифровий; ІФП – інтерфейсний пристрій; П, П1–Пn – підсилювачі;

ППЕ, ППЕ1–ППЕn – проміжні перетворювальні елементи; ПФКВ – пристрій

формування керувальних впливів; ЧЕ, ЧЕ1–ЧЕn – чутливі елементи;

ЧЦП – частотно-цифровий перетворювач

Урахування за допомогою МПС через функції впливу дії цих чинників забезпечує зменшення похибки засобу вимірювання. За такою схемою будуть засоби для вимірювання тиску, температури, рівня, витрати тощо. У цьому разі основний і допоміжний параметри можна вимірювати методами прямого або зрівноваженого перетворення. Найефективніше застосування МПС у засобах аналітичної техніки, коли поряд з вимірюванням основного та низки

допоміжних параметрів потрібно керувати вузлами аналітичного пристрою і виконувати у великому обсязі обчислення, пов'язані з обробкою інформації.

Узагальнену структурну схему автоматичного аналізатора якості показано на рис. 4.9, б. В аналізаторах, які виконують вимірювання одного параметра, основний сигнал вимірювальної інформації формується в аналітичному пристрої за допомогою того чи того детектора.

Для зменшення похибки аналізатора і забезпечення нормального його функціонування за допомогою низки ЧЕі вимірюються параметри, за значеннями яких коригується статична характеристика, стабілізуються режимні параметри аналітичного пристрою та виконуються потрібні для проведення аналізу його перемикачів. Функції стабілізації та перемикачів реалізуються МПС через пристрій формування керувальних впливів. В аналітичний блок можна подавати (крім аналізованої та допоміжних речовин) зразкову речовину для забезпечення періодичного самоградування аналізатора.

Потрібні для керування роботою цих пристроїв (і стабілізації їх режимних параметрів) сигнали формуються МПС і надходять до аналітичних пристроїв через пристрій формування керувальних впливів.

### **4.3.3. Застосування засобів цифрової обчислювальної техніки у вимірювальних системах**

Вимірювальні системи (див. рис. 1.1 і 1.2 Кн. 1), тепер широко застосовують у системах автоматичного контролю, регулювання та керування хіміко-технологічними процесами. Вимірювальні системи з декількома ПВП та одним вторинним приладом (див. рис. 1.3) мають обмежені функціональні можливості й ускладнюють засоби автоматичного регулювання параметрів.

Застосування вимірювальних систем з індивідуальним вторинним приладом для кожного ПВП (див. рис. 1.2 Кн. 1) у сучасних хіміко-технологічних процесах, де потрібно вимірювати сотні параметрів, пов'язане з істотним збільшенням площі щитів контролю і керування та ускладненням роботи оператора через збільшений обсяг інформації. Навіть дуже досвідчений оператор не може належно опрацювати й використати отриману такими системами інформацію, тому часто цим займаються одночасно декілька операторів<sup>11</sup>.

Підвищення потужностей технологічних установок, значне збільшення в зв'язку з цим кількості вимірюваних параметрів, розвиток цифрової техніки обробки інформації і перехід до оптимізації процесів завдяки застосуванню АСК технологічними процесами визначили нові тенденції розвитку вимірювальних систем, застосування у технологічних процесах поряд із системами

---

<sup>11</sup> Інша проблема може виникнути, коли потрібен аналіз інформації, що надходить від декількох джерел, причому отримані дані мають надходити в строго заданих діапазонах, які залежать від значень даних інших вимірювальних каналів. Прикладом може бути оцінка якості харчового продукту, коли такі показники, як забарвлення, рН, запах і вміст цукру, мають перебувати в заданих діапазонах, залежних один від одного. Наприклад, що більший вміст цукру, то вищим має бути допустиме значення рН. Завдання схожого типу – стимулювали розвиток систем зі штучним інтелектом (визначення поняття *штучний інтелект* вперше запропоновано Д. Маккарті в 50-х роках ХХ ст.) на основі нечіткої логіки і штучних нейронних мереж.

автоматичного контролю систем технічної діагностики та систем розпізнавання зразків, об'єднаних поняттям «вимірювальна інформаційна система» (ВІС) – сукупність засобів вимірювальної техніки, засобів контролю, діагностування, ідентифікації (розпізнавання образів) та інших технічних засобів, об'єднаних для створення сигналів вимірювальної й інших видів інформації.

У галузі вимірювальної техніки, пов'язаної з ВІС, використовують такі поняття:

– *вимірювально-обчислювальна система* – ВІС, до складу якої входить програмнокерований цифровий обчислювальний пристрій (МП, мікро- чи міні-ЕОМ тощо);

– *вимірювально-обчислювальний комплекс* – універсальне ядро ВІС, що включає всі засоби цифрової обробки, збереження, реєстрації та відображення вимірювальної інформації, крім ПВП.

Навіть однотипні системи контролю з приблизно однаковим набором технічних засобів можна реалізовувати на базі різних функціональних схем. На рис. 4.10 показано функціональні схеми трьох автоматичних систем неруйнівного контролю якості: паралельної (рис. 4.10, а), послідовної (рис. 4.10, б) та сканувальної (рис. 4.10, в) дій.

Кожна із систем включає один або кілька ПВП, що перетворюють вхідні фізичні величини в уніфіковані електричні сигнали, АЦП, лінії зв'язку з приймальними перетворювачами на кінці, ЕОМ або МП для нагромадження та оброблення інформації, ОЗП, пристрої відображення інформації.

У системах паралельної дії перед ЕОМ додатково підключено мультиплексор для передавання масивів інформації від вимірювальних каналів до ЕОМ. У системах послідовної дії з меншою кількістю апаратних засобів комутатор по черзі підключає до АЦП виходи ПВП. У сканувальних системах потрібну інформацію від об'єкта отримують за допомогою сканера та одного ПВП, який може бути одночасно і випромінювачем якогось поля (наприклад, акустичного, оптичного, радіохвильового, теплового), і його приймачем (наприклад, із розподілом цих функцій у часі).

Усі ці системи містять підсистеми збирання та первинного оброблення інформації (ПВП, комутатори, АЦП), канали зв'язку, підсистеми вторинної обробки інформації (ЕОМ або МП), пристрої (чи підсистеми) відображення інформації. Робота кожної з автоматичних систем ґрунтується на отриманні інформації, надаваної використаними в них засобами вимірювальної техніки, які водночас є інформативними засобами вимірювальних систем або підсистем, вимірювальних каналів, вимірювальних приладів, вимірювальних перетворювачів (зокрема ПВП).

У разі автоматизації технологічних процесів, коли завдання вимірювання технологічних параметрів вирішують у нерозривному зв'язку із завданнями регулювання та керування, ВІС створюються у межах АСК технологічними процесами на базі керувальних електронних обчислювальних

машин чи керувальних обчислювальних комплексів, які входять до складу АСК технологічними процесами.

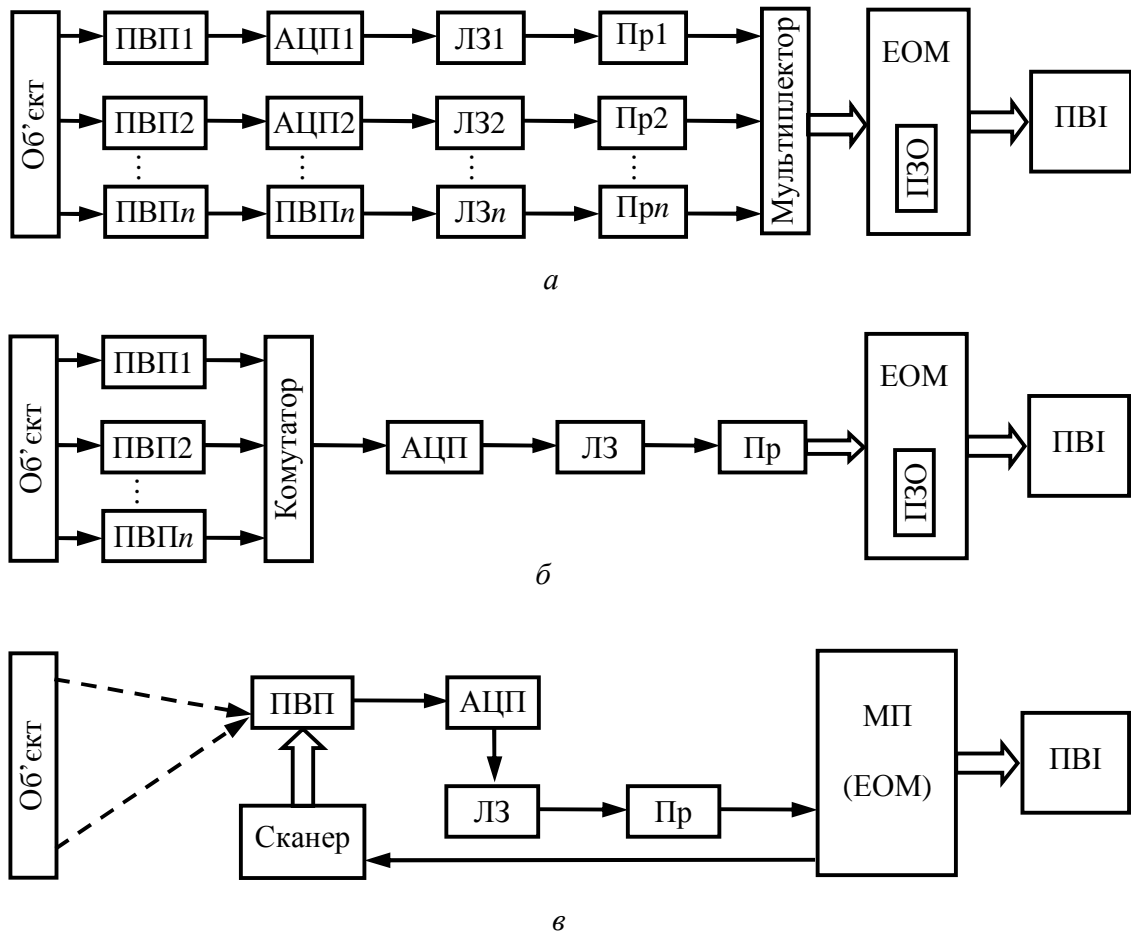


Рис. 4.10. Функціональні схеми автоматичних систем неруйнівного контролю:  
 а – паралельної дії; б – послідовної дії; в – сканувальної дії;  
 ЛЗ – лінії зв'язку; Пр – приймальні перетворювачі;  
 ПВІ – пристрої відображення інформації

Широке застосування в сучасних ВІС і керувальних обчислювальних комплексах МП, міні- та мікро-ЕОМ, побудованих за магістрально-модульною структурою, забезпечує простоту нарощування апаратних засобів і можливість змінювати завдання, розв'язувані ВІС або керувальними обчислювальними комплексами, не тільки змінюючи їх технічний склад, а й за допомогою програмування. З огляду на це всі різновиди ВІС (вимірювальні системи збирання й оброблення інформації, системи автоматичного контролю, технічної діагностики та ідентифікації, тобто розпізнавання технічних зразків) мають, по суті, однакову структуру, узагальнений вигляд якої подано на рис. 4.11.

Первинна вимірювальна інформація, наприклад про параметри хіміко-технологічного процесу як об'єкта контролю чи керування, виробляється ПВП. Сигнали ПВП уніфікуються та перетворюються за формою і видом енергії (наприклад, пневматичні перетворюються в електричні) у блоці

аналогових проміжних перетворювачів. Уніфіковані аналогові електричні сигнали в блоці АЦП перетворюються в код і надходять у цифровий пристрій, яким у сучасних ВІС служать міні- чи мікро-ЕОМ. В окремих випадках як цифрові пристрої використовують МП чи спеціалізовані обчислювальні пристрої. Як пристрої виведення у ВІС використовують дисплеї, цифрові індикатори, сигналізатори, нагромаджувачі на магнітних стрічках тощо.

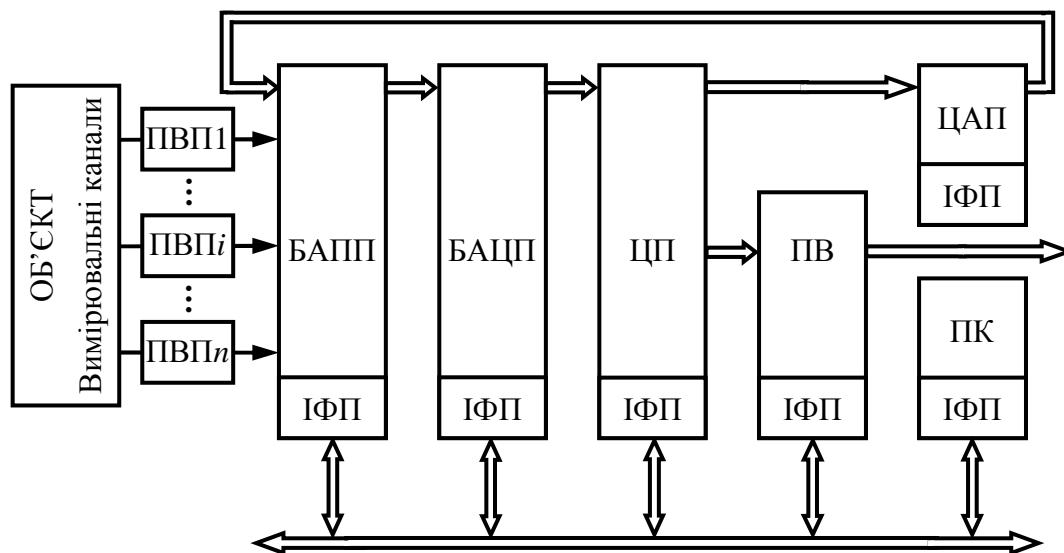


Рис. 4.11. Структурна схема інформаційно-обчислювальної системи:  
 БАПП – блок аналогових проміжних перетворювачів; БАЦП – блок АЦП;  
 ІФП – інтерфейсні пристрої; ПВ – пристрої виведення; ПК – пристрій керування; ЦП – цифровий пристрій

Блок ЦАП служить для формування компенсувальних впливів у процесі перетворення вимірюваних величин. Усі функціональні блоки ВІС можуть з'єднуватися між собою через стандартні інтерфейсні пристрої, а загальне керування ВІС здійснюється пристроєм керування. В окремих випадках реалізації деяких блоків ВІС може не бути. Наприклад, якщо вимірювальні пристрої ВІС мають вихідний сигнал у вигляді коду, то немає потреби включати до її складу аналогові проміжні перетворювачі та блок АЦП.

Для автоматизації хіміко-технологічних процесів ВІС виконують функції вимірювання, контролю і технічної діагностики, використовуючи вимірювальну інформацію, що надходить від ПВП (ці функції реалізуються програмними засобами вимірювально-обчислювального комплексу). Одна з основних функцій ВІС – збирання й оброблення вимірювальної інформації. При цьому ВІС забезпечують виконання як прямих, так і непрямих вимірювань, зокрема розрахунок техніко-економічних показників процесу.

Як приклад використання МП у ВІС і керувальних обчислювальних комплексах розглянемо роботу мікропроцесорного пристрою для вимірювання та

регулювання витрати. В описаних аналогових пристроях вимірювання витрати з використанням звужувальних пристроїв (п. 4.5.3 Кн. 1) значення густини газу, пари та води обчислюються за змінами тиску й температури тільки приблизно, позаяк змінювання значень коефіцієнта стисливості газу  $K$ , коефіцієнта розширення  $\varepsilon$  газу та пари у звужувальному пристрої, коефіцієнта витрати  $\alpha$  для всіх середовищ (або коефіцієнта витікання) не враховуються, так само приблизно задаються значення коефіцієнтів  $k_{ш}$  і  $k_{п}$ . Високоточне обчислення цих коефіцієнтів стало можливим тільки за допомогою мікропроцесорних пристроїв із цифровою обробкою даних вимірювань.

Структурну схему для однієї труби, характерну для всіх сучасних мікропроцесорних витратомірів, показано на рис. 4.12. На схемі зображено переважний склад таких пристроїв-витратомірів. Коректори газу (інакше обчислювачі, лічильники та газолічильники) призначено для обчислення витрат газу, наприклад, за формулами Міждержавного стандарту ГОСТ 8.563.1–97 з урахуванням змінюваних параметрів (тиску, температури, вологості) за сигналами витратоміра. Здебільшого це дифманометри витратомірів зі звужувальними пристроями та напірними трубками. Однак інколи застосовують турбінні та вихрові витратоміри. Додатково в коректор можна вводити сигнали від калориметра газу та густиноміра.

Коректори газу застосовують як для технологічного контролю, так і в складі вузлів комерційного обліку природного й інших газів (кисню, азоту, повітря та ін.). Подібні коректори можуть також обслуговувати три трубопроводи, які можуть належати різним споживачам. У різних трубопроводах може бути різний склад природного газу та різні типи датчиків витрати, тиску і температури, густини та питомої теплоти згоряння. Коректори розраховані на тиск газу в трубопроводах 0,05...12 МПа, температуру – мінус 30...65 °С, уміст вологи в об'ємних частках – до 0,15.

Коректори забезпечують:

- виведення результатів вимірювань і обчислень на табло;
- архівування значень параметрів: погодинні архіви за 840 год, добові архіви за 300 діб, місячні архіви за 24 місяці;
- збереження архівів і введеної бази даних протягом 10 років, прив'язку архівів до розрахункової години та розрахункового дня;
- захист даних і результатів обчислень від несанкціонованої зміни;
- компенсацію зсуву нуля і діапазону датчиків тиску та перепаду тиску;
- автоматичне визначення та контроль параметрів потоку газу;
- контроль рівнів вхідних електричних сигналів;
- архівування діагностичних повідомлень із прив'язкою за часом.

Поточні й архівні значення всіх вимірюваних параметрів і результатів обчислень виводять на табло коректора, принтер (для документування результатів вимірювань) і комп'ютер – безпосередньо або через телефонний модем.



Отриману за допомогою ВІС інформацію поділяють на оперативну, статистичну та звітну. *Оперативною* називають інформацію, використовувану для контролю та керування технологічним процесом. Важлива її частина – інформація про техніко-економічні показники виробничої діяльності. *Статистичною* називають інформацію, отримувану на основі багаторазових вимірювань, вона дозволяє робити висновки про якість технологічного процесу протягом тривалого часу (кілька годин, днів, місяців). *Звітною* називають інформацію, що містить відомості про кількість, якість і асортимент сировини, проміжних і кінцевих продуктів технологічного процесу.

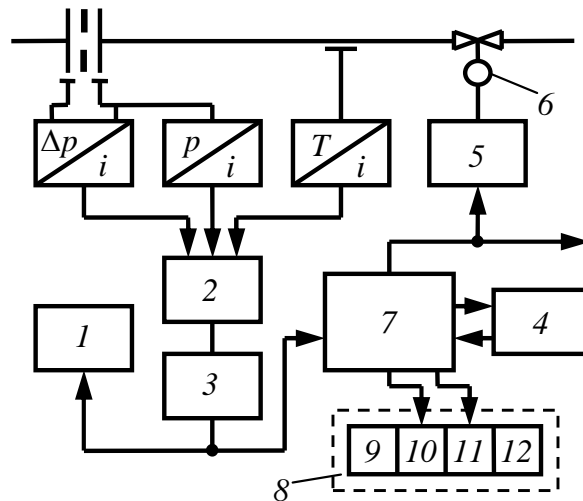


Рис. 4.12. Структурна схема пристрою для вимірювання та регулювання витрат за допомогою ЕОМ:

1 – один або кілька рядків цифрового табло для індикації вимірюваних та обчислюваних величин та позаштатних ситуацій; 2 – електронний комутатор входних сигналів від одного або декількох ПВП витрати ( $\Delta p / i$ ), одного манометричного ( $p / i$ ) й одного термометричного ( $T / i$ ) приладів; 3 – перетворювач входних сигналів у цифровий код; 4 – клавіатура для виведення контрольованих параметрів і введення призначуваних параметрів, коефіцієнтів та процедур (інструкцій); 5 і 6 – зовнішні регулювальні пристрої із виконавчими механізмами, керовані сигналами лічильника; 7 – контролер і центральний процесор; 8 – програма для обчислювальної обробки даних; 9 – ПЗП з набором сталих величин і коефіцієнтів; 10 – підпрограми обчислення різних величин (густини, швидкості потоку, маси й об’єму речовини, що перетекла трубопроводом за певний відтинок часу, та ін.) і коефіцієнтів (наприклад, розширення); 11 – ОЗП з набором інструкцій; 12 – інтерфейс для роботи із зовнішніми пристроями (принтером, ПЕОМ, модемом для зв’язку телефонною лінією тощо)

Ще один важливий напрям використання ВІС, який останнім часом набув особливо інтенсивного розвитку, – технічне діагностування, що надає інформацію про несправності та пошкодження устаткування, на підставі якої виявляють місця ушкоджень і встановлюють причини несправностей. Завдання технічного діагностування виконують з використанням контрольних карт процесу, оцінок змінних станів і параметрів математичних моделей процесу, методів розпізнавання технічних образів, інформаційних графів.

## 4.4. ЦИФРОВІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

### 4.4.1. Загальні відомості

Останні два десятиліття ознаменувалися стрімким підвищенням надійності та здешевленням цифрових обчислювальних машин (ЦОМ) і тепер для створення САК ТП дедалі ширше застосовують ЦОМ. З огляду на це доцільно мати уявлення про можливості й особливості цифрових систем автоматичного керування (ЦСАК), які зазвичай входять до складу автоматизованих систем керування хіміко-технологічними процесами.

Характерна вада аналогових автоматичних систем контролю та керування – обмеженість можливостей обробки даних. У таких системах важко чи навіть неможливо змінити спосіб обробки даних. Використання в автоматичній системі ЕОМ (або мікропроцесорного пристрою) дає змогу значно збільшити кількість операцій над сигналами, виконати швидкий аналіз таких характеристик, які не можна отримати прямими вимірюваннями, спростити обробку сигналів інформації та керування. ЕОМ може нормалізувати сигнали вимірювальної інформації, ідентифікувати неправильні дані, фільтрувати шумові завади сигналам, зменшувати похибки вимірювань, забезпечувати адаптацію до об'єкта й оптимальне узгодження з ним елементів автоматичної системи.

Особливість цифрових систем керування порівнянно з аналоговими полягає в тому, що закони керування в них реалізуються у вигляді алгоритмів, за якими обробляються квантовані (дискретні в часі) сигнали, що можуть приймати лише дискретні значення як результат квантування за амплітудою в АЦП, ЦАП і центральному процесорі. Багато ЦОМ здатні приймати й обробляти декілька вхідних сигналів, тому ЦСАК часто бувають багатовимірними.

Функціональну схему одноконтурної ЦСАК ТП зображено на рис. 4.13 [13]. Технологічний об'єкт керування ТОК має на виході безперервний сигнал  $y(t)$ , що вимірюється датчиком і перетворюється в цифрову форму аналого-цифровим перетворювачем АЦП, який на розсуд дослідника (розробника) може розглядатись як окремий пристрій або як складова частина ЦОМ.

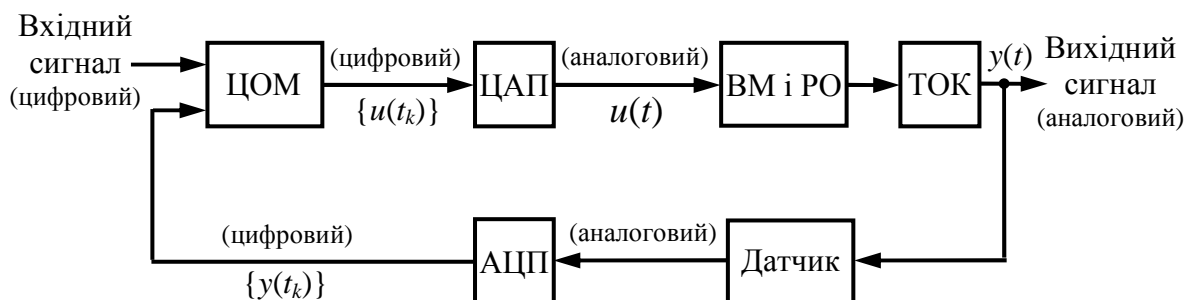


Рис. 4.13. Загальна структура цифрових систем автоматичного керування технологічними процесами

Перетворення вказаного сигналу здійснюється у моменти дискретизації  $t_k$ . Перетворений сигнал  $\{y(t_k)\}$  інтерпретується ЦОМ як послідовність чисел; ЦОМ виконує її зміну за деяким алгоритмом і генерує нову послідовність чисел  $\{u(t_k)\}$ . Отримана таким чином послідовність цифр перетворюється цифро-аналоговим перетворювачем ЦАП у безперервний сигнал  $u(t)$ . Варто зазначити, що система між ЦАП і АЦП розімкнена.

Робота системи синхронізується у комп'ютері таймером реального часу. Цифрова обчислювальна машина функціонує послідовно: кожна операція триває певний час, але на виході ЦАП має бути безперервний у часі сигнал. Зазвичай цього досягають збереженням сталого рівня керувального впливу між перетвореннями: ЦСАК ТП мають як безперервні, так і квантовані (дискретні за часом) сигнали, тому такі системи традиційно називають дискретними.

За наявності різнотипних сигналів під час описання поведінки системи можуть виникнути певні труднощі. Однак часто можна обмежитися описом поведінки системи у моменти квантування. У цьому разі сигнали розглядаються тільки у дискретні моменти часу, тому використовують системи, які називаються системами дискретного часу. Такі системи оперують послідовностями чисел і для їх описання потрібно застосовувати різницеві рівняння.

Прогрес автоматизованого керування ТП визначають чотири фактори:

- знання про ТОК і динаміку процесів, які відбуваються у ньому;
- технологія вимірювання керованих змінних;
- обчислювальна техніка;
- теорія автоматичного керування.

Знання про ТОК і процеси, що у ньому відбуваються, накопичуються дуже повільно. Однак можливості вивчення характеристик ТОК значно розширюються з упровадженням систем керування, оскільки при цьому спрощується збирання даних, проведення експериментів, а також аналіз результатів. Ідентифікація систем і аналіз даних сприяє отриманню цінної інформації про динаміку ТОК.

Технологія вимірювання керованих змінних на сучасному рівні дає змогу використовувати виходи декількох різних датчиків і за допомогою відповідних математичних моделей визначати інтегровані параметри ТП. Крім того, можлива реалізація автоматичного налагодження параметрів. Створення нових, наприклад, сканувальних датчиків, відкриває нові можливості для синтезу ЦСАК ТП. Виникнення надвеликих інтегральних схем сприяло розвитку обчислювальної техніки. Уже зараз спостерігається значне зниження відношення вартості до можливостей ЕОМ, збільшення продуктивності мікроЕОМ і значне поліпшення дисплейної техніки та засобів зв'язку.

Одним із «вузьких місць» теорії керування і далі залишається програмування. Зазвичай у галузі автоматичного керування технологічними процесами подолання цієї перешкоди здійснювалося за допомогою таблично-керованого математичного забезпечення. Користувач систем пря-

мого цифрового керування (ПЦК) забезпечувався пакетом ПЦК, що значно спростило генерування системи. Для цього користувачу достатньо було заповнити таблицю. Таким чином, з'явилися тенденції щодо подальшого розвитку та вдосконалення ЦСАК ТП.

#### 4.4.2. Спрощений аналіз цифрових систем автоматичного керування технологічними процесами з мікро- або міні-ЕОМ

Для дослідження ЦСАК ТП з мікро- або міні-ЕОМ (ММЕОМ) застосовують передавальні функції. Дискретною передавальною функцією окремої ланки називають відношення  $z$ -перетворення вихідного сигналу  $y_{\text{вих}}(z)$  до  $z$ -перетворення вхідного сигналу  $y_{\text{вх}}(z)$  за нульових початкових умов, тобто

$$W(z) = y_{\text{вих}}(z) / y_{\text{вх}}(z)^{12}. \quad (4.2)$$

<sup>12</sup> Вхідні та вихідні сигнали ЦСАК ТП належать до класу гратчастих функцій, значення яких з'являється у дискретні рівновіддалені моменти часу. У проміжках моментів значення функцій дорівнюють нулю.

Позначимо гратчасту функцію (рис. 4.14), що з'являється у момент часу  $t = nT$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ) як  $y(n)$  або  $y_n = y(nT)$ . Гратчаста функція

$$y_n = y(nT) = y(n) = \begin{cases} y(t), & \text{якщо } t = nT; \\ 0 & \text{за інших } t, \end{cases} \quad (4.3)$$

де  $T$  – період дискретності системи.

Дискретні значення функції  $y(t)$  можна подати у вигляді ряду

$$y^*(t) = y(0) \cdot \delta(t) + y(T) \cdot \delta(t - T) + \dots + y(nT) \cdot \delta(t - nT), \quad (4.4)$$

де  $y(0), y(T), \dots, y(nT)$  – значення сигналу  $y(t)$  у дискретні моменти часу  $t: 0, T, \dots, nT$ ;  $\delta(t), \delta(t - T), \dots, \delta(t - nT)$  – імпульсні функції, зсунені одна відносно одної на період дискретності.

Гратчаста функція (4.3) утворюється внаслідок пропускання безперервного сигналу через імпульсний елемент (ІЕ) системи. Площа амплітуди вихідних імпульсів має дорівнювати значенням вхідного сигналу  $y(t)$  у відповідні моменти часу, тому вираз (4.4) складається із суми добутків  $y(nT)$  на  $\delta(t - nT)$ .

У зручнішій формі вираз (4.4) можна записати так:

$$y^*(t) = \sum_{n=0}^{\infty} y(nT) \delta(t - nT). \quad (4.5)$$

Знайшовши перетворення Лапласа від лівої та правої частини виразу (4.5), отримуємо

$$y^*(p) = \sum_{n=0}^{\infty} y(nT) \exp(-pnT), \quad (4.6)$$

де  $p$  – оператор Лапласа.

Формула (4.6) є дискретним перетворенням Лапласа для безперервної функції. Використавши заміну  $\exp(pT) = z$ , дістаємо раціональну функцію від змінної у вигляді

$$y(z) = \sum_{n=0}^{\infty} y(nT) z^{-n}. \quad (4.7)$$

Аналіз виразу (4.7), який називають  $z$ -перетворенням дискретної функції часу, показує, що змінна  $z$  складається із серії імпульсів  $y(nT)$ , зсунутих один відносно одного на період дискретності системи ( $z$ -перетворення багатьох найуживаніших функцій табульовані).

[Продовження на наступній сторінці]

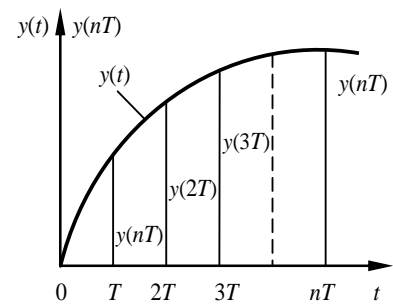


Рис. 4.14. Гратчаста функція

З метою отримання загального виразу для визначення передавальної функції окремого контура ЦСАК ТП з ММЕОМ скористаємося схемою (рис. 4.15), де  $y_1, \dots, y_n$  – керовані змінні;  $u_1, \dots, u_n$  – керувальні впливи;  $f_1, \dots, f_n$  – збурення;  $g_1, \dots, g_n$  – сигнали завдання.

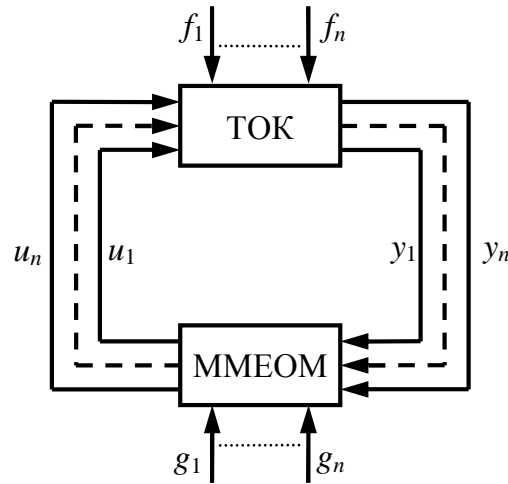


Рис. 4.15. Структурна схема ЦСАК ТП з мікро- або міні-ЕОМ

На одну ММЕОМ, як правило, замикається декілька контурів керування. Оскільки аналіз такої системи надто громіздкий, обмежимося одним контуром керування ТОК. У багатьох практичних випадках дослідження ЦСАК ТП [13] можна звести до розгляду окремих контурів, які до неї входять.

Вважатимемо, що окремий контур керування складається з безперервної та дискретної частин. Дискретним нелінійним елементом (ланкою) є ММЕОМ. Вона складається з трьох частин (рис. 4.16): вхідного блока ВхБ, центрального процесорного блока ЦПБ і вихідного блока ВихБ.



Рис. 4.16. Склад мікро- та міні-ЕОМ

Вхідний блок виконує квантування сигналів за часом та рівнем. Першою ланкою цього блока є імпульсний елемент ІЕ1 (рис. 4.17), що здійснює перетворення безперервної вхідної змінної на дискретні імпульси. Другою ланкою є кодувальний елемент (КЕ), що перетворює імпульси на код їх квантуванням за рівнем. Центральний процесорний блок можна

У загальному випадку  $z$ -перетворення функції вигляду

$$F(p) = F_1(p) F_2(p)$$

визначають за виразом

$$Z\{F(p)\} = Z\{F_1(p) F_2(p)\},$$

де  $F_1(p)$  і  $F_2(p)$  – передавальні функції.

подати як дискретний фільтр (ДФ), що перетворює, згідно з прийнятим алгоритмом, один цифровий (дискретний) сигнал у інший, причому ці сигнали подаються у двійковому коді. Вихідний блок складається з нелінійного елемента (НЕ), що перетворює код на послідовність імпульсів, імпульсного елемента ІЕ2, який розподіляє канали керування (КК) в часі, й екстраполятора (Е), що генерує безперервну ступінчасту функцію. У більшості випадків як екстраполятор використовують фіксувальний пристрій (екстраполятор нульового порядку), призначений для запам'ятовування вихідних сигналів протягом інтервалів між їх надходженнями (впродовж періоду дискретності  $T$ ).

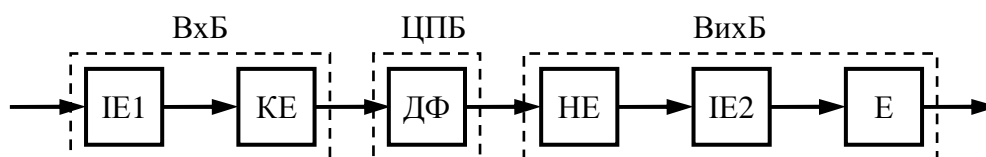


Рис. 4.17. Структура мікро- та міні-ЕОМ

Нелінійність ЕОМ зумовлена квантуванням сигналів за рівнем елементами КЕ та НЕ. Однак застосування цифрової системи автоматичного керування (ЦСАК) ТП вигідне лише тоді, коли потрібна висока точність обробки інформації, тому крок квантування за рівнем обирається достатньо малим, чого досягають збільшенням кількості розрядів перетворювачів КЕ і НЕ. За цих умов під час дослідження динаміки роботи ЦСАК ТП у першому наближенні можна не враховувати квантування за рівнем, тобто знехтувати елементами КЕ і НЕ. Тоді система стає лінійною, і для її аналізу можна застосовувати апарат, розроблений для імпульсних систем.

Вважатимемо, що елементи ІЕ1 і ІЕ2 працюють синхронно і синфазно. Тоді спрощену структуру ММЕОМ можна подати у вигляді, наведеному на рис. 4.18.

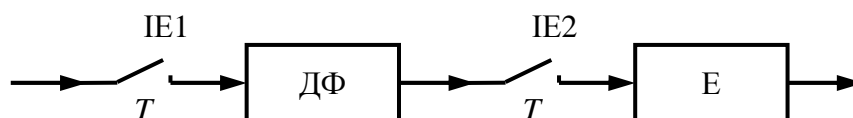


Рис. 4.18. Спрощена структура ММЕОМ

Для того, щоб отримати загальний вираз дискретної передавальної функції розімкненої системи, розглянемо структурну схему розімкненого контура керування (рис. 4.19) [13]. Тут  $D(z)$  – передавальна функція ДФ;  $W_e(p)$  – передавальна функція екстраполятора Е;  $W_o(p)$  – передавальна функція безперервної частини (виконавчий пристрій і ТОК). Імпульсні елементи ІЕ1, ІЕ2 та ДФ – дискретна частина системи, а екстраполятор Е і безперервна частина системи (НЧС) утворюють зведену безперервну частину (ЗНЧ). Зведена безперервна частина, на вхід якої подається ступінчаста функція  $u^*$ , називається фільтром із запам'ятовуванням або фільтром із фіксацією.

Поведінку одного контура ЦСАК ТП у розімкненому стані відповідно до виразу (4.2) можна визначити дискретною передавальною функцією

$$W(z) = y(z) / e(z) = D(z)W_{\text{ЗНЧ}}(z), \quad (4.8)$$

де  $e(z) = g(z) - y(z)$  – похибка системи керування.

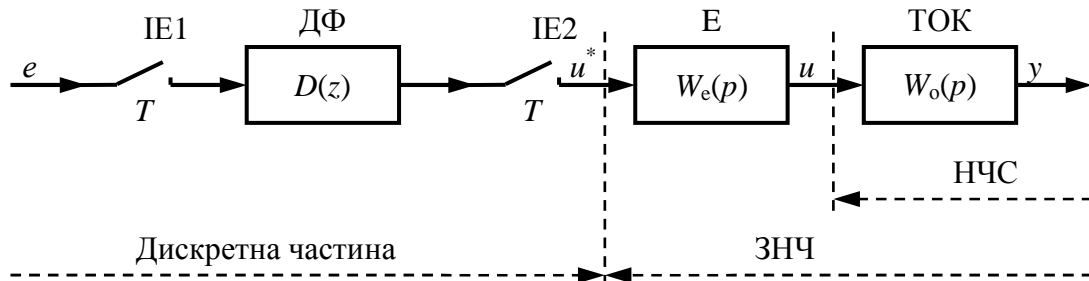


Рис. 4.19. Структурна схема розімкненого контура керування

Як видно з рис. 4.18, передавальна функція ЗНЧ системи

$$W_{\text{ЗНЧ}}(p) = W_e(p)W_o(p), \quad (4.9)$$

де  $W_o(p)$  – передавальна функція ТОК;  $W_e(p)$  – передавальна функція ідеального екстраполятора нульового порядку (ЕНП), що визначається як

$$W_e(p) = \frac{u^*(p)}{u(p)} = \frac{1 - e^{-pT}}{p} = \frac{e^{pT} - 1}{e^{pT}} \cdot \frac{1}{p} = \frac{z - 1}{zp}. \quad (4.10)$$

Використавши вираз (4.9) і перейшовши до  $z$ -перетворення після підставлення у нього виразу (4.10), отримаємо загальний вираз дискретної передавальної функції ЗНЧ системи

$$W_{\text{ЗНЧ}}(z) = \frac{z - 1}{z} Z \left\{ \frac{W_o(p)}{p} \right\}. \quad (4.11)$$

Підставивши вираз (4.11) у вираз (4.8), отримаємо дискретну передавальну функцію окремого розімкненого контура керування

$$W_K(z) = D(z) \frac{z - 1}{z} Z \left\{ \frac{W_o(p)}{p} \right\}.$$

Отже, визначення дискретної передавальної функції окремого контура керування зводиться до пошуку передавальної функції  $W_o(p)$  розімкненої НЧС, переходу до її  $z$ -перетворення та множення його на  $D(z)$  і  $(z - 1)/z$ .

Узагальнену структурну схему цифрової системи автоматичного керування та регулювання (ЦСАК та ДСАР) ТП, реалізовану на базі мікро-ЕОМ, зображено на рис. 4.20.

Системі властиві такі особливості.

1. На мікро-ЕОМ реалізуються: цифровий регулятор (передавальна функція  $D(z)$ ), ДФ (передавальна функція  $W_{\phi}(z)$ ), ЕНП (передавальна функція  $W_e(z)$ )<sup>13</sup>. Дискретні виходи регулятора запам'ятовуються протягом періоду дискретності системи.

2. Керована змінна  $y(t)$  подається в мікро-ЕОМ, де порівнюється із заданим значення  $g(t)$ . Отже, сигнал похибки керування  $e(t)$  теж обчислюється в мікро-ЕОМ.

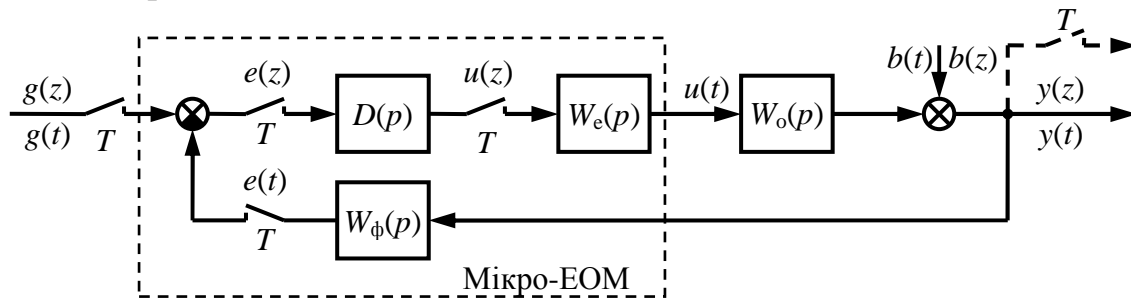


Рис. 4.20. Структурна схема цифрової системи автоматичного керування та регулювання

3. Вихідний сигнал з мікро-ЕОМ (керувальний вплив  $u(t)$ ) через пристрій зв'язку з об'єктом (ПЗО) у вигляді безперервного сигналу подається на аналоговий виконавчий механізм (ВМ); отже, розглядувана система є системою прямого цифрового керування (ПЦК).

4. Збурювальний вплив  $b(t)$  прикладено до виходу ТОК.

До цифрової системи автоматичного керування технологічним процесом висувають такі вимоги.

1. Для ДСАР ТП, що здійснюють стабілізацію керованих параметрів технологічного процесу, найважливішими вимогами є астатизм (відсутність складових статичної похибки, спричинених дією зовнішніх впливів) і стійкість системи.

2. Вимоги до якості перехідних процесів у керованій змінній системі визначаються залежно від вимог технології і не є однаковими й тими самими для всіх ЦСАК ТП. Однак для всіх систем бажані аперіодичні перехідні процеси, тривалість яких по можливості мінімальна.

3. Характерна особливість автоматичних систем стабілізації – змінність динамічних властивостей ТОК зі зміною їх продуктивності. У зв'язку з цим цифрові регулятори мають бути, по можливості, малочутливими до зміни параметрів ТОК або мати властивості адаптації.

4. Для мікро-ЕОМ, обчислювальні можливості яких обмежені, актуальна проблема полягає у компактності алгоритмів з погляду мінімізації

<sup>13</sup> Під терміном «цифровий регулятор» розумітимемо алгоритм керування, що реалізується в мікро-ЕОМ на основі поточних і попередніх значень як керувального впливу, так і похибки керування. Цей алгоритм можна подати у вигляді різницевого рівняння або передавальної функції. Розрахунок дискретної системи зводиться до визначення такої передавальної функції вказаного регулятора, який забезпечить потрібну якість керування ТП.



обсягу потрібної пам'яті й забезпечення найбільшої швидкодії під час визначення керувальних впливів.

Усі наведені вимоги беруть до уваги під час обрання або аналітичного конструювання цифрового регулятора.

#### **4.4.3. Програмне забезпечення цифрових систем автоматичного керування технологічними процесами**

*Програмне забезпечення (ПЗ)* – це сукупність програм, які застосовують у процесі підготовки та реалізації поставлених завдань у ЦСАК ТП. Процес розроблення ПЗ – один з найбільш тривалих і трудомістких етапів проектування ЦСАК ТП, але використання вже створеного ПЗ дає змогу в подальшому істотно прискорити розроблення такої системи в цілому.

Згідно з виконуваними функціями ПЗ ЦСАК ТП можна поділити на прикладне (функціональне) та системне.

Під *прикладним ПЗ* розуміють сукупність програм, які розробляють для реалізації алгоритмів функціонування в ЦСАК ТП. Програми, що реалізують керування в системі, записують у модульному вигляді. Додержання принципу модульності забезпечує не тільки максимальну наочність текстів, а й істотно полегшує налагодження прикладних програм, на що часто витрачають більше часу, ніж на розроблення алгоритму керування та написання тексту самої програми. Для збереження принципу модульності прикладної програми доцільно йти навіть на деяке збільшення часу її виконання.

*Системне ПЗ* – це сукупність програм для забезпечення розроблення прикладного (функціонального) ПЗ.

Мікропроцесорна техніка, яку використовують в АСК ТП хімічних виробництв, має спеціальне застосування і призначена для розв'язання специфічних задач, тому найчастіше від розробників не вимагають створення гнучких універсальних програмних та апаратних засобів. Однак для отримання низької вартості та високої ефективності створеної ЦСАК ТП розробникам слід чітко координувати роботи у процесі проектування й створення апаратних засобів і ПЗ. У цьому разі ПЗ слід умонтовувати у виріб. Отже система, яку отримує замовник, не є пристроєм для програмування загального призначення, а вміщує програми, що забезпечують її успішне функціонування, при цьому ПЗ умонтоване у виріб назавжди чи на значний термін. Оператор-технолог, який працює з МПС, має вільно її експлуатувати, не тільки не вникаючи в тонкощі програмування, а й не знаючи нічого про вбудований МП чи мікро-ЕОМ і ПЗ.

Викладені вимоги потрібно враховувати під час проектування системного й функціонального ПЗ. Так, приміром, більша частина ПЗ має бути «прошитою» в ПЗП. Функціональне ПЗ має бути розроблене так, щоб була можливість його простої модифікації під час налагодження МПС і подальшого «прошивання» у ПЗП. Воно має бути простим для освоєння й експлуатації та не вимагати знань функціонального ПЗ.

Розроблення функціонального ПЗ проводять у такій послідовності. Спочатку складають ієрархічну структуру САК ТП для наочного подання логічних зв'язків та інформаційних потоків. Розробник складає таку структуру системи на свій розсуд, урахуваючи її подальше розроблення, налагодження і супроводження. Після цього складають детальні блок-діаграми, використовуючи такі структури, як ланцюжок блоків, блок алгоритмів та алгоритм. Під час їх опису треба вказувати: значення параметрів, коефіцієнти фільтрації, динаміку ТОК, розмір буферів, контакти, змінні, параметри тощо. Ці дані використовують під час виклику алгоритмів. Після цього розробляють логічну процедуру, яка визначає, з яких функцій і залежно від чого вони мають бути виконані. Під час складання блок-діаграми одночасно розробляють і структуру бази даних: кожному елементу присвоюють ідентифікатор, що записується в схематичному зображенні виклику алгоритму. Нарешті, складають базу даних згідно з блок-діаграмами.

Наведена технологія розроблення функціонального ПЗ дозволяє вирішувати проблему розроблення широкого класу безперервних, дискретних і безперервно-дискретних САК, застосовуваних у хімічній промисловості.

Для прикладу наведемо розробку функціонального ПЗ ЦСАК рівнем рідини у резервуарі відкритого типу [13]. Припустимо, що потрібно розробити та дослідити цифрову систему автоматичного керування рівнем рідини, принципову схему якої наведено на рис. 4.25.

Рідина через РО  $1$  надходить у трубопровід  $2$ , а далі – у резервуар рідини  $3$ , в якому встановлюється рівень рідини  $h$ . Із резервуара через технологічний вентиль  $4$  вона відводиться трубопроводом  $5$  у виробництво. Рівень рідини вимірюють датчиком рівня  $1-1$ , сигнал з якого надходить у цифровий регулятор  $1-2$ , що своїми керувальними впливами за допомогою ВМ  $1-3$  змінює положення РО  $1$ , а отже, і витрату рідини  $Q_{п}$ , яка проходить через нього.

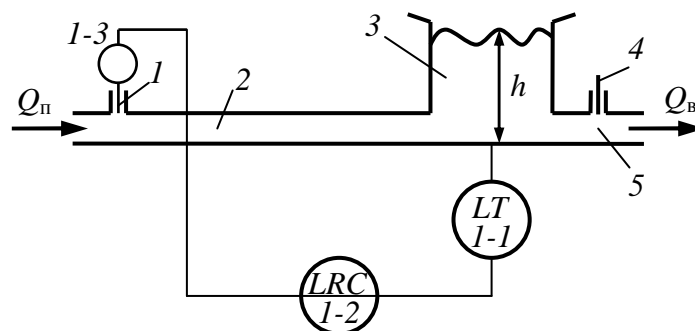


Рис. 4.25. Принципова схема ЦСАК рівнем рідини:  
 $1$  – регулювальний орган;  $2, 5$  – трубопроводи;  $3$  – резервуар;  $4$  – вентиль

Принципову схему для розроблення математичної моделі ТОК наведено на рис. 4.26. Технологічний об'єкт керування складається із резервуара рідини відкритого типу  $3$ , РО  $1$ , довгого трубопроводу  $2$  і технологічного вентиля  $4$ .

Резервуар рідини можна подати диференціальним рівнянням

$$\frac{dV}{dt} = Q_{\text{п}} - Q_{\text{в}}, \quad (4.12)$$

де  $V$  – об’єм рідини у резервуарі;  $Q_{\text{п}}$  і  $Q_{\text{в}}$  – витрата рідини, що подається у резервуар і виходить із нього відповідно.

Об’єм рідини у резервуарі

$$V = Fh, \quad (4.13)$$

де  $F$  і  $h$  – площа поверхні рідини у резервуарі рідини і її рівень.

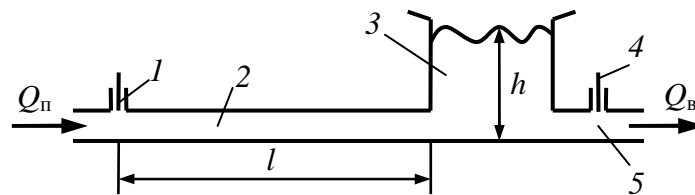


Рис. 4.26. Принципова схема ТОК

Витрата рідини

$$Q_{\text{в}} = f\sqrt{2gh}, \quad (4.14)$$

де  $f$  – площа поперечного перерізу технологічного вентиля;  $g$  – прискорення вільного падіння.

Підставимо вирази (4.13) і (4.14) у рівняння (4.12). Тоді

$$F \frac{dh}{dt} + f\sqrt{2gh} = Q_{\text{п}}. \quad (4.15)$$

Аналіз рівняння (4.15) показує, що це нелінійне диференціальне рівняння; ним не можна скористатись для подальшого дослідження розглядаваної САК, тому лінеаризуємо його. Для незначного відхилення рівня  $h$  рідини від його заданого  $h^0$  значення нелінійне диференціальне рівняння (4.12) можна замінити лінійним диференціальним рівнянням

$$\frac{dV}{dt} = \Delta Q_{\text{п}} - \Delta Q_{\text{в}}, \quad (4.16)$$

де  $\Delta V$ ,  $\Delta Q_{\text{п}}$  і  $\Delta Q_{\text{в}}$  – відхилення об’єму рідини, витрати рідини, що надходить і витікає із резервуара рідини, від їх усталених значень  $V^0$ ,  $Q_{\text{п}}^0$  і  $Q_{\text{в}}^0$ .

Ці відхилення можна записати так:

$$\Delta V = F\Delta h, \quad F = \text{const}; \quad (4.17)$$

$$\Delta Q_{\text{в}} = \left( \frac{\partial Q_{\text{в}}}{\partial f} \right)^0 \Delta f + \left( \frac{\partial Q_{\text{в}}}{\partial h} \right)^0 \Delta h, \quad (4.18)$$

де  $\Delta f$  і  $\Delta h$  – відхилення площі поперечного перерізу технологічного вентиля і рівня рідини від їх усталених значень  $f^0$  і  $h^0$ .

Запишемо частинні похідні від (4.14) по  $f$  і  $h$ , підставляючи в отримані вирази усталені значення цих змінних:

$$\left(\frac{\partial Q_B}{\partial f}\right)^0 = \sqrt{2gh^0} = \frac{f^0}{f^0} \sqrt{2gh^0} = \frac{Q_B^0}{f^0}, \quad (4.19)$$

$$\left(\frac{\partial Q_B}{\partial h}\right)^0 = f^0 \frac{1}{2} (2gh^0)^{\frac{1}{2}-1} 2g = \frac{1}{2} \frac{2gh^0}{\sqrt{2gh^0}} \frac{\sqrt{2gh^0}}{\sqrt{2gh^0}} = \frac{1}{2} \frac{Q_B^0}{h^0}. \quad (4.20)$$

Підставимо вирази (4.19) і (4.20) у вираз (4.18). Тоді відхилення витрати рідини

$$\Delta Q_B = \frac{Q_B^0}{f^0} \Delta f + \frac{1}{2} \frac{Q_B^0}{h^0} \Delta h. \quad (4.21)$$

Підставивши вирази (4.17) і (4.21) у лінійне диференціальне рівняння (4.16), отримаємо:

$$F \frac{d\Delta h}{dt} + \frac{1}{2} \frac{Q_B^0}{h^0} \Delta h = \Delta Q_{\Pi}^0 - \frac{Q_B^0}{f^0} \Delta f. \quad (4.22)$$

У стандартній формі рівняння (4.22) записують так:

$$\frac{2Fh^0}{Q_B^0} \frac{d\Delta h}{dt} + \Delta h = \frac{2h^0}{Q_B^0} \Delta Q_{\Pi}^0 - \frac{2h^0}{f^0} \Delta f.$$

Увівши заміни  $\Delta h = y(t)$ ;  $\Delta Q_{\Pi} = u(t)$ ;  $\Delta f = f(t)$ ;  $T_o = 2V / Q_B$  – стала часу ТОК (резервуара рідини);  $k_o = 2h^0 / Q_B^0$  – коефіцієнт підсилення резервуара рідини у каналі керування КК;  $k_f = 2h^0 / f^0$  – коефіцієнт підсилення резервуара у каналі збурення, отримаємо останній вираз у більш зручній формі:

$$T_o(dy/dt) + y(t) = k_o u(t) - k_f f(t). \quad (4.23)$$

В операційній формі диференціальне рівняння (4.23) можна подати у вигляді

$$(T_o p + 1) y(p) = k_o u(p) - k_f f(p), \quad (4.24)$$

де  $y(p)$ ,  $u(p)$  і  $f(p)$  – зображення за Лапласом вихідної змінної (рівня рідини), керувального впливу (витрата рідини, що надходить у резервуар) і збурювального впливу (площі поперечного перерізу технологічного вентиля) відповідно.

Тоді передавальна функція згідно з рівнянням (4.24) для каналу керування

$$W_o(p) = y(p) / u(p) = k_o / (T_o p + 1), \quad (4.25)$$

а для каналу збурення

$$W_f(p) = y(p) / f(p) = k_f / (T_o p + 1). \quad (4.26)$$

Трубопровід 2, яким рідина надходить до резервуара 3 рідини, у динамічному відношенні являє собою ланку запізнювання. Значення цього

запізнювання  $\tau = l / v$ , де  $l$  і  $v$  – довжина трубопроводу 2 і швидкість рідини, що протікає по ньому, відповідно.

Таким чином, передавальна функція трубопроводу

$$W_{\tau}(p) = \exp(-p\tau). \quad (4.27)$$

Отже, передавальна функція резервуара рідини для каналу керування з урахуванням виразу (4.27)

$$W_o(p) = \frac{k_o \exp(-p\tau)}{T_o p + 1}. \quad (4.28)$$

На основі передавальних функцій (4.26) і (4.28) на рис. 4.27 зображено структурну схему ТОК, що розглядається в аналоговому варіанті.

У  $z$ -формі передавальна функція (4.28) має вигляд

$$W_o(z) = \frac{y(z)}{u(z)} = k_o \frac{1 - a_p}{1 - a_p z^{-1}} z^{-(k+1)}, \quad (4.29)$$

де  $y(z)$  і  $u(z)$  – зображення в  $z$ -формі вихідної змінної  $y(t)$  і керувального впливу  $u(t)$ ;  $a_p = \exp(-T/T_o)$ ;  $k = \tau / T$ , де  $T$  – період дискретності системи.

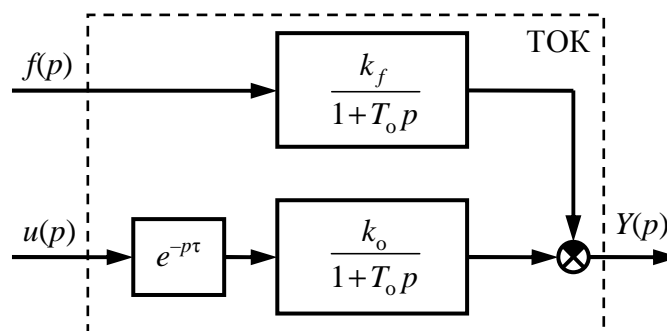


Рис. 4.27. Структурна схема ТОК (аналоговий варіант)

Передавальна функція (4.26) у  $z$ -формі має вигляд

$$W_f(z) = \frac{y(z)}{f(z)} = k_f \frac{1 - a_p}{1 - a_p z^{-1}} z^{-1}, \quad (4.30)$$

де  $f(z)$  – зображення у  $z$ -формі збурювального впливу  $f(t)$ .

Наявність дискретних передавальних функцій (4.29) і (4.30) дає змогу скласти структурну схему ТОК у дискретному варіанті (рис. 4.28).

Таким чином, маючи математичний опис розглядуваного ТОК, можна визначити відповідні передавальні функції ЦСАК рівнем рідини.

Виходячи зі структурної схеми резервуара рідини як технологічного об'єкта керування рівня (рис. 4.28), на рис. 4.29 зображено структурну схему аналогової системи автоматичного керування і регулювання рівнем рідини.

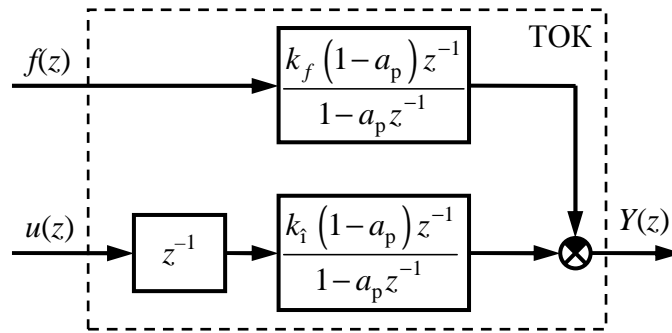


Рис. 4.28. Структурна схема ТОК (дискретний варіант)

Для визначення передавальної функції регулятора рівня запишемо передавальну функцію замкненої системи у вигляді

$$\Phi(p) = y(p) / g(p) = \exp(-p\tau) / (T_3 p + 1), \quad (4.31)$$

де  $g(p)$  – зображення за Лапласом задавального впливу;  $T_3$  – стала часу замкненої системи.

Як видно з рис. 4.29, якщо  $f(p) = 0$ , то

$$y(p) = W_o(p)D(p)[g(p) - y(p)].$$

Звідси передавальна функція аналогового регулятора рівня рідини

$$D(p) = \frac{y(p)/g(p)}{W_o(p)[1 - y(p)/g(p)]}.$$

Оскільки  $\Phi(p) = y(p)/g(p)$ , то

$$D(p) = \frac{1}{W_o(p)} \frac{\Phi(p)}{[1 - \Phi(p)]}. \quad (4.32)$$

Підставивши у вираз (4.32) вирази (4.25.) і (4.31), отримаємо передавальну функцію аналогового регулятора рівня рідини

$$D(p) = \frac{U(p)}{e(p)} = \frac{(1 + T_o p)}{k_o [1 - \exp(-p\tau) + T_3 p]}. \quad (4.33)$$

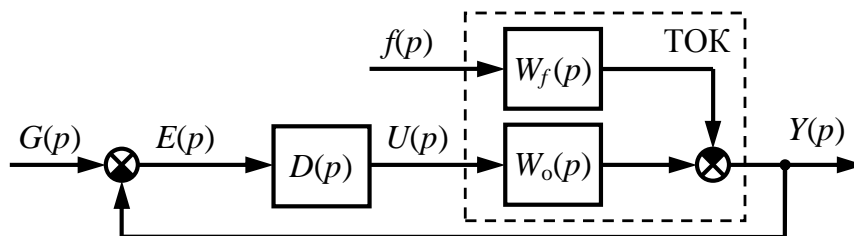


Рис. 4.29. Структурна схема САК і САР рівнем рідини (аналоговий варіант)

Якщо скористатись структурною схемою ТОК (рис. 4.29), то структурну схему ЦСАК і ДСАР можна подати так, як показано на рис. 4.30.

Якщо  $f(p) = 0$ , то зображення вихідної змінної у  $z$ -формі

$$y(z) = W_o(z)D(z)[g(z) - y(z)],$$

де  $W_o(z) = \frac{z-1}{z} Z \left\{ \frac{W_o(p)}{p} \right\}$  – дискретна передавальна функція ТОК для каналу керування.

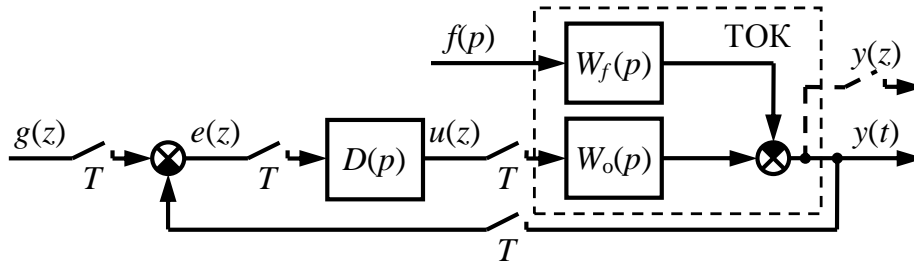


Рис. 4.30. Структурна схема САК та САР рівнем рідини (дискретний варіант)

Отже, дискретна передавальна функція регулятора рівня рідини

$$D(z) = \frac{1}{W_o(z)} \cdot \frac{y(z)/g(z)}{1 - y(z)/g(z)}. \quad (4.34)$$

Оскільки  $y(z)/g(z)$  – це дискретна передавальна функція замкненої системи, то її можна визначити, скориставшись передавальною функцією (4.31). У цьому разі дискретна передавальна функція замкненої системи буде такою:

$$\Phi(z) = \frac{y(z)}{g(z)} = \frac{1 - a_3}{1 - a_3 z^{-1}} z^{-(k+1)}, \quad (4.35)$$

де  $a_3 = \exp(-T/T_3)$ .

Тоді, підставивши вирази (4.29) і (4.35) у вираз (4.34), отримаємо дискретну передавальну функцію регулятора рівня рідини:

$$D(z) = \frac{(1 - a_3)(1 - a_p z^{-1})}{k_o(1 - a_p) \left[ 1 - a_3 z^{-1} - (1 - a_3) z^{-(k+1)} \right]}. \quad (4.36)$$

Аналіз передавальної функції (4.33) показує, що реалізувати її на базі аналогових засобів автоматизації практично неможливо через наявність елемента запізнювання у її знаменнику. І навпаки, реалізація дискретної передавальної функції (4.36) на базі мікро-ЕОМ не викликає будь-яких труднощів.

Технічну структуру розгляданої системи керування можна зобразити так, як це показано на рис. 4.31 [13]. Рівень рідини  $h$  вимірюють за допомогою датчика рівня 1-1, а в АЦП вимірювальна інформація перетворюється

на дискретний (цифровий) сигнал (код), який надходить в елемент перевірки відхилення вихідної змінної ЕПВВЗ за межі, встановлені технологічним регламентом.

Якщо вихідна змінна перебуває в заданих межах, то вона надходить на експоненціальний фільтр ЕФ з метою її згладжування, тобто фільтрації. Після цього вихідна змінна порівнюється з її заданим значенням в елементі порівняння ЕП, а сигнал похибки (неузгодження) потрапляє в елемент обмеження сигналу похибки ЕОСП. У цьому елементі, як і в ЕПВВЗ, здійснюється перевірка відповідності обчисленого значення сигналу похибки встановленим межах. Якщо сигнал перебуває у допустимих межах, то він проходить на вхід елемента нечутливості відхилення сигналу похибки ЕНВП, а звідти – в цифровий регулятор ДР, який і виробляє керувальний вплив відповідно до реалізованого у ньому алгоритму керування.

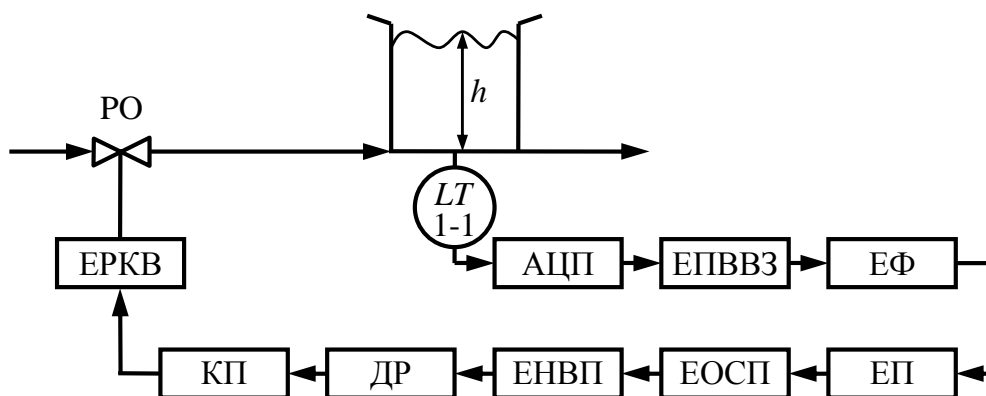


Рис. 4.31. Технічна структура ДСАР та ЦСАК рівня рідини

Значення виробленого керувального впливу надходять до комірки пам'яті КП, і на їх підставі елемент реалізації керувального впливу ЕРКВ здійснює відповідні переміщення РО. Елементом реалізації керувального впливу може бути ВМ (пневматичний чи електричний), кроковий двигун тощо.

Кожному технічному елементу системи, зокрема й ТОК, відповідає певний програмний модуль. Для реалізації кожного із зазначених модулів у бібліотеці функціональних алгоритмів є своя підпрограма. А для забезпечення можливості налагодження всієї системи керування методом цифрового моделювання у бібліотеці функціональних алгоритмів є програмні модулі, за допомогою яких можна моделювати різноманітні ТОК. Це дає змогу під час налагодження всієї САК ТП змінювати значення динамічних характеристик таких ТОК і за допомогою цього вивчати їх вплив на поведінку ЦСАК ТП.



## 4.5. ЗАСТОСУВАННЯ КОНТРОЛЕРІВ І ЕЛЕКТРОННИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ МАШИН У СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ

### 4.5.1. Промислові мережі, інтерфейси, протоколи обміну

Обмін інформацією між пристроями, що входять до складу автоматизованої системи (комп'ютерами, контролерами, датчиками, виконавчими пристроями), відбувається в загальному випадку через промислову мережу (*Fieldbus*, «польову шину»). *Промисловою мережею* називають комплекс обладнання та програмного забезпечення, які здійснюють комунікацію (обмін інформацією) між декількома пристроями. В Україні переважна більшість АСК ТП використовують мережі Modbus та Profibus. З'єднання промислової мережі з її компонентами (пристроями, вузлами мережі) виконується за допомогою інтерфейсів.

*Інтерфейс* (від англ. *interface* – поверхня поділу, перегородка) – сукупність засобів, методів і правил взаємодії (керування, контролю тощо) між елементами системи. *Мережевим інтерфейсом* називають логічну та/або фізичну межу між пристроєм і середовищем передавання інформації. Найбільш важливими параметрами інтерфейсу є пропускна здатність і максимальна довжина кабелю, що підключається. Промислові інтерфейси зазвичай забезпечують гальванічну розв'язку (відсутність прямого електричного контакту) між сполучуваними пристроями. Найбільш поширені в промисловій автоматизації послідовні інтерфейси *RS-485*, *RS-232*, *RS-422*, *Ethernet*, *CAN*, *HART*, *AS*-інтерфейс.

У будь-якій моделі взаємодії можна вирізнити пристрій, який керує іншим (підлеглим) пристроєм. Пристрій, що виявив ініціативу в обміні, називають *тяговім*, *головним* або *майстром* (*Master*). Пристрій, який відповідає на запити майстра, називають *веденим*, *підлеглим* або *слейвом* (*Slave*). Ведений пристрій ніколи не починає комунікацію першим, він чекає запиту від головного і лише відповідає на запити.

Передавання інформації в мережі виконується через канал між передавальним і приймальним пристроями. Канал включає лінію зв'язку та приймально-передавальні пристрої. У загальному випадку замість терміну «лінія зв'язку» використовують термін «середовище передачі», яким може виступати, наприклад, оптоволокно, ефір або вита пара проводів.

Мережі можуть мати топологію зірки, кільця, шини або змішану. У промисловій автоматизації загальноприйнята шинна топологія. До загальної шини в різних місцях може бути підключено довільну кількість пристроїв.

**Інтерфейс RS-485.** Інтерфейс *RS-485* найбільш поширений у промисловій автоматизації. Його використовують промислові мережі *Modbus*, *Profibus DP*, *ARCNET*, *BitBus*, *WorldFip*, *LON*, *Interbus* і безліч нестандартних мереж.

До основних переваг RS-485 належать:

- двосторонній обмін даними за допомогою лише однієї виті пари проводів;
- робота з декількома трансиверами (прийомопередавачами), підключеними до однієї лінії, тобто можливість організації мережі;
- велика довжина лінії зв'язку (до 1200 метрів);
- досить висока швидкість передачі (залежить від довжини лінії зв'язку: від 62,5 кбіт/с за довжини 1200 м і однієї виті пари, до 2400 кбіт/с за довжини 100 м і двох витих пар).

В основі побудови інтерфейсу RS-485 лежить диференціальний спосіб передавання сигналу, коли напруга, що відповідає рівню логічної одиниці або нуля, відраховується не від «землі», а вимірюється як різниця потенціалів між двома передавальними лініями:  $Data+$  і  $Data-$ . При цьому напруга кожної лінії відносно «землі» може бути довільною, але не може виходити за межі мінус 7...12 В.

Для мінімізації чутливості лінії передачі до електромагнітного наведення використовується вита пара проводів. Струми, що наводяться в сусідніх витках унаслідок електромагнітної індукції за «правилом гвинта», будуть спрямованими назустріч один одному, тому взаємно компенсуються.

Інтерфейс RS-485 має дві версії: двопровідну та чотирипровідну. Двопровідна використовується для *напівдуплексної* передачі, коли інформація може передаватися в обох напрямках, але в різний час. Для *дуплексної* передачі використовують чотири лінії зв'язку: по двох інформація передається в одному напрямку, по двох інших – у зворотному. Вада чотирипровідної схеми – потреба у жорсткому визначенні головного та ведених пристроїв ще на стадії проектування системи, тоді як у двопровідній схемі будь-який пристрій може бути як головним, так і веденим. Перевага чотирипровідної схеми полягає у можливості одночасного передавання та приймання даних.

**Інтерфейси RS-232 та RS-422.** Інтерфейс RS-422 використовують значно рідше, ніж RS-485 і, як правило, не для створення мережі, а для з'єднання двох пристроїв на великій відстані (до 1200 м), оскільки інтерфейс RS-232 працездатний лише на відстані до 15 м. Кожен передавач RS-422 може бути навантажено десятьма приймачами.

**Інтерфейс «струмова петля»** використовується для передачі інформації з 50-х років ХХ ст. Спочатку в ньому використовувався струм 60 мА, пізніше набув поширення інтерфейс зі струмом 20 мА (переважно в телетайпних апаратах), а у 80-х роках стали дедалі частіше застосовувати «струмову петлю» 4...20 мА в різноманітному технологічному устаткуванні, датчиках і виконавчих механізмах засобів автоматики. Популярність «струмової петлі» знизилася після впровадження стандарту на інтерфейс

RS-485 (1983 р.), нині в новому обладнанні її майже не застосовують через низьку швидкодію. «Струмова петля» удруге набула поширення в протоколі *HART*.

**Протоколи обміну.** Для обміну інформацією взаємодійні пристрої повинні мати однаковий протокол обміну. У простій формі *протокол* – це набір правил, які керують обміном інформацією. Він визначає синтаксис і семантику повідомлень, операції керування, синхронізацію та стани під час комунікації. Протокол може бути реалізований апаратно, програмно або програмно-апаратно. Назва мережі зазвичай збігається з назвою протоколу, що пояснюється його визначальною роллю у створенні мережі.

*HART-протокол* (*Highway Addressable Remote Transducer* – магістральний адресований віддалений перетворювач) – відкритий стандарт на метод мережевого обміну, який включає не лише протокол взаємодії пристроїв, але також і вимоги до апаратури каналу зв'язку. *HART* застосовують для зв'язку контролера з датчиками та вимірювальними перетворювачами, електромагнітними клапанами, локальними контролерами, для зв'язку з іскробезпечним устаткуванням. Типова сфера застосування *HART* – достатньо дорогі інтелектуальні пристрої (електромагнітні клапани, датчики потоку рідини, радарні рівнеміри тощо), а також вибухобезпечне устаткування, де низька потужність *HART*-сигналу дає змогу легко задовольнити вимоги стандартів на іскробезпечні електричні кола.

Під час створення *HART*-протоколу ставили за мету зробити його сумісним з поширеним у той час стандартом «струмова петля», але додати можливостей, потрібних для керування інтелектуальними пристроями. З огляду на це аналогову «струмову петлю» 4... 20 мА було модернізовано так, що з'явилася можливість напівдуплексного цифрового обміну даними. Для цього аналоговий сигнал підсумовується з цифровим сигналом і отримана таким чином сума передається за допомогою джерела струму 4...20 мА через лінії зв'язку. Завдяки значній відмінності діапазонів частот аналогового (0...10 Гц) і цифрового (1200 і 2200 Гц) сигналів їх легко можна розділити фільтрами низьких і високих частот в приймальному пристрої. Аналоговий сигнал зазвичай містить інформацію про вимірювану величину, а цифровий – про одиниці виміру та діапазон вимірювання, про вихід величини за межі динамічного діапазону, про тип датчика, найменування виробника тощо). В окремому випадку *HART*-протокол може використати тільки цифровий сигнал, без аналогового, або тільки аналоговий сигнал 4...20 мА, без цифрового.

У *HART*-мережі лише один вузол може посилати сигнал, в той час як інші «слухають» лінію. Ініціює процедуру обміну провідний пристрій (контролер або ручний комунікатор). Ведені отримують команду і посилають відповідь на неї. Мережа на основі *HART*-протоколу може підключатися до інших мереж (*Modbus*, *Profibus*, *Ethernet*) за допомогою відповідних

шлюзів. У мережі також широко використовують мультиплексори, що дають змогу підключити до одного контролера декілька *HART*-мереж і одночасно виконати роль шлюзу. Для підключення *HART*-мережі або *HART*-пристрою до комп'ютера потрібен спеціальний *HART*-інтерфейс.

Традиційний *HART*-протокол використовують разом зі «струмовою петлею» 4...20 мА. Проте в додатках, де немає «струмової петлі», можна використати тільки програмний протокол «*HART*-протокола» спільно з іншими методами реалізації фізичного каналу зв'язку. Наприклад, можна видалити усі аналогові блоки і підключити до універсального приймача (*UART*) перетворювач інтерфейсу *RS-485*. При цьому властивості каналу зв'язку відповідатимуть інтерфейсу *RS-485*, а протокол – стандарту *HART*. Можлива також передача *HART*-сигналу виділеною телефонною лінією через оптоволокно або радіоканал.

*Modbus*. Протокол *Modbus* і *Modbus*-мережа – найпоширеніші у світі. Незважаючи на свій вік (стандартом де-факто *Modbus* став ще 1979 р.), *Modbus* не лише не застарів, а навпаки, кількість нових розробок і обсяг організаційної підтримки цього протоколу істотно зросли. Мільйони *Modbus*-пристроїв успішно працюють по всьому світу.

Переваги *Modbus* полягають у відсутності потреби в спеціальних інтерфейсних контролерах (*Profibus* і *CAN* вимагають для своєї реалізації замовлених мікросхем), простота програмної реалізації та досконалість принципів функціонування. Високий ступінь відкритості протоколу забезпечується також повністю безкоштовними текстами стандартів.

#### 4.5.2. Контролери для систем автоматизації

Перші контролери з'явилися на межі 60-х і 70-х років ХХ ст. на складальних лініях автомобілів як альтернатива надзвичайно дорогим комп'ютерам і будувалися на жорсткій логіці (програмувалися апаратно). Проте переналаштування з однієї технологічної лінії на другу вимагало фактично виготовлення нового контролера, тому з'явилися контролери, алгоритм роботи яких можна було змінити дещо простіше – за допомогою схеми з'єднань реле – вони отримали назву *програмованих логічних контролерів* (ПЛК). Часто терміни «контролер» і «ПЛК» використовують як синоніми.

Дещо пізніше з'явилися ПЛК, які можна було програмувати на машиннозорієнтованій мові, що було простіше конструктивно, але вимагало участі програміста для внесення навіть незначних змін в алгоритм керування. Прагнення спростити програмування ПЛК привело спочатку до створення мов високого рівня, потім – спеціалізованих мов візуального програмування. Цей процес завершився створенням міжнародного стандарту *IEC 1131-3* (МЕК 61131-3)<sup>14</sup>, який підтримує п'ять мов технологічного

---

<sup>14</sup> *IEC* – *International Electrotechnical Commission* – Міжнародна електротехнічна комісія (МЕК).

програмування, що виключає потребу в залученні професійних програмістів для створення систем із контролерами<sup>15</sup> [4].

Програмовані логічні контролери використовують майже в усіх сферах людської діяльності: для автоматизації технологічних процесів, у системах протиаварійного захисту і сигналізації, у верстатах з ЧПК, для керування дорожнім рухом, у системах життєзабезпечення будівель, для збору й архівації даних, у системах зв'язку, для керування космічними кораблями, для автоматизації випробувань продукції тощо.

Жорсткі обмеження на вартість і велика різноманітність цілей автоматизації привели до неможливості створення універсального ПЛК. Область автоматизації висуває безліч завдань, тому з'явилися сотні несхожих один на одного контролерів, що розрізняються десятками параметрів. Вибір оптимального для конкретного завдання контролера ґрунтується зазвичай на відповідності функціональних характеристик контролера вирішуваним задачам за умови мінімальної його вартості. Враховуються також інші важливі характеристики (температурний діапазон, надійність виробника, наявність сертифікатів тощо).

Незважаючи на велику різноманітність контролерів, у їх розвитку помітні такі загальні тенденції: зменшення габаритних розмірів, розширення функціональних можливостей, збільшення кількості підтримуваних інтерфейсів і мереж, використання ідеології «відкритих систем», використання мов програмування стандарту МЕК 61131-3, зниження ціни.

Ще одна тенденція – поява в контролерах ознак комп'ютера (наявність миші, клавіатури, монітора, ОС Windows, можливості підключення жорсткого диска), таким чином, апаратні відмінності між комп'ютером і контролером поступово зникають. Основними відмінними ознаками контролера залишаються його призначення і наявність технологічної мови програмування.

**Типи ПЛК.** Основний показник ПЛК – кількість каналів введення–виведення. За цією ознакою їх поділяють на такі групи: *нано-ПЛК* (до 16 каналів); *мікро-ПЛК* (понад 16, до 100 каналів); *середні* (понад 100, до 500 каналів); *великі* (понад 500 каналів).

За розташуванням модулів введення–виведення ПЛК поділяють на *моноблочні*, в яких пристрій введення–виведення не може бути видаленим з контролера або заміненим на інший; *модульні*, що складаються із загального шасі, в якому розміщено модуль центрального процесора та

---

<sup>15</sup> Стандарт МЕК 61131-3 встановлює п'ять мов програмування з такими назвами: структурований текст (*ST – Structured Text*); послідовні функціональні схеми (*SFC – Sequential Function Chart*); діаграми функціональних блоків (*FBD – Function Block Diagram*); релейно-контактні схеми, або релейні діаграми (*LD – Ladder Diagram*); список інструкцій (*IL – Instruction List*). *SFC, FBD, LD* – графічні мови, а *IL* і *ST* – текстові.

змінні модулі введення–виведення; *розподілені* (з віддаленими модулями введення–виведення), в яких модулі введення–виведення виконані в окремих корпусах, з'єднуються з модулем контролера по мережі (зазвичай на основі інтерфейсу *RS-485*) і можуть бути розміщені на відстані до 1,2 км від процесорного модуля.

*За способом програмування* контролери бувають: програмовані з лицьової панелі контролера; програмовані переносним програматором; програмовані за допомогою дисплея, миші та клавіатури; програмовані за допомогою ПК.

Контролери можуть програмуватися мовами МЭК 61131-3, використовуються також мови *C, C++, Visual Basic*.

**Архітектура ПЛК.** Архітектурою контролера називають набір його основних компонентів і зв'язків між ними. Типовий склад ПЛК включає центральний процесор, пам'ять (постійний запам'ятовувальний пристрій – ПЗП та оперативний запам'ятовувальний пристрій – ОЗП), мережеві інтерфейси та пристрої введення–виведення (рис. 6.1). Іноді ця конфігурація доповнюється пристроєм для програмування і пультом оператора, пристроями індикації, рідше – принтером, клавіатурою, мишею або трекболом.

*Процесорний модуль* включає мікропроцесор (центральний процесорний пристрій – ЦПП), ПЗУ, ОЗУ, таймер реального часу та сторожовий таймер. Основними характеристиками мікропроцесора є розрядність (у ПЛК використовуються 8-, 16- та 32-розрядні мікропроцесори), тактова частота, архітектура, наявність операцій з рухомою точкою, типи підтримуваних портів введення–виведення, температурний діапазон працездатності і споживана потужність. Продуктивність мікропроцесорів з однією і тією самою архітектурою пропорційна тактовій частоті. Для контролерів, що виконують інтенсивну математичну обробку даних, важлива наявність математичного співпроцесора (допоміжного процесора, що виконує операції з рухомою точкою) або сигнальних процесорів, у яких операції типу  $Y = AV + X$  виконуються за один такт.

*Обсяг пам'яті* визначає кількість змінних (тегів), які можуть бути оброблені в процесі функціонування ПЛК. У мікропроцесорах час доступу до пам'яті – один із суттєвих чинників, що обмежують швидкодію, тому пам'ять ділять на декілька рівнів залежно від частоти використання даних, що зберігаються в ній, та швидкодії. Основний тип пам'яті – ПЗП, ОЗП та набір регістрів. Регістри – найшвидкодійніші елементи пам'яті, оскільки вони використовуються арифметико-логічним пристроєм (АЛП) для виконання елементарних команд процесора. Постійний запам'ятовувальний пристрій використовують для зберігання рідко змінюваної інформації, такої, як операційна система, драйвери пристроїв, завантажувач, виконуваний модуль програми користувача. Для зберігання

даних, які багаторазово змінюються в процесі роботи контролера, наприклад, значення тегів, результати проміжних обчислень, діагностична інформація, масиви, що виводяться на графіки, дані для відображення на дисплеї використовують ОЗУ.

*Сторожовий таймер* – це лічильник, який рахує імпульси тактового генератора й у нормальному режимі періодично перезапускається працюючим процесором. Якщо процесор «зависає», сигнали скидання не надходять у лічильник, і він, досягнувши деякого порогу, виробляє сигнал «скидання» для перезапуску «завислого» процесора. *Таймер реального часу* – кварцовий годинник, що живиться від батареї, тому продовжує йти у вимкненому ПЛК.

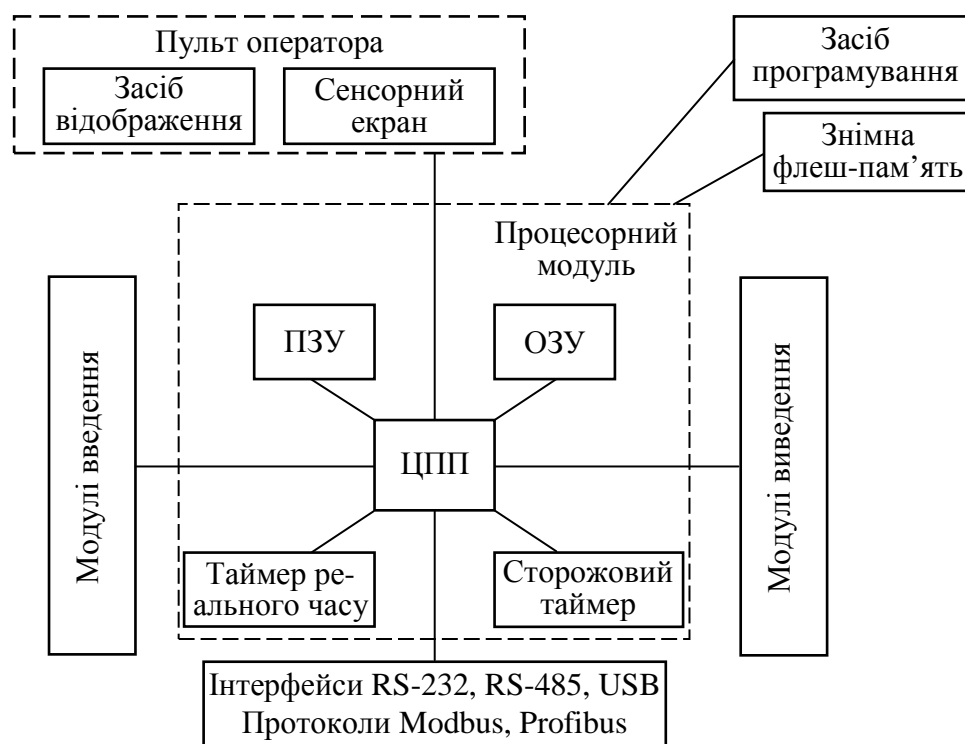


Рис. 6.1. Типова архітектура ПЛК

Моноблочні і модульні контролери зазвичай використовують паралельну шину для обміну даними з модулями введення–виведення, що дозволяє на порядок підвищити швидкодію їх опитування порівняно з послідовною шиною. Паралельні шини можуть бути стандартними (*ISA, PC/104, PCI, ComactPCI, VME, CXM*) або приватнофірмовими. Послідовна шина контролера (на основі інтерфейсу *RS-485*) використовується для підключення до нього віддалених (розподілених) модулів введення–виведення. Швидкодію процесорного модуля ПЛК зазвичай оцінюють за часом виконання логічних команд, оскільки вони найбільш поширені під час реалізації алгоритмів керування.

*Програмування* контролерів малої потужності виконується за допомогою кнопок, розміщених на лицьовій панелі або за допомогою переносного пульта для програмування. Як пульт останнім часом використовують комп'ютер формату «ноутбук». Програмування потужних контролерів виконують за допомогою персонального комп'ютера, на якому встановлене спеціальне програмне забезпечення.

**Характеристики ПЛК.** До них належать *продуктивність* ПЛК (оцінюється за тривалістю контролерного циклу, що включає період прочитування значень з каналів введення, оброблення в процесорі та запису в канали виведення, часу виконання команд, пропускну здатності шини між контролером і модулями введення–виведення, пропускну здатності промислової мережі, часу реакції контролера, тобто інтервалу часу від моменту виникнення впливу на систему з боку модулів введення або оператора до моменту вироблення відповідної реакції); можливість *гарячої* (тобто без відключення живлення) заміни елементів системи; *надійність, завадостійкість, ступінь захисту від впливу довкілля.*

Для підвищення безпеки систем автоматизації в контролерах використовують команди керування безпечними станами, що забезпечують реалізацію операції автоматичного рестарту автоматизованої системи після переривання живлення або після відновлення працездатного стану.

Напрями подальшого розвитку промислових ПЛК – зниження габаритних розмірів та ваги, підвищення стійкості до зовнішніх впливів, поліпшення зручності монтажу та спрощення пусконаладгодження систем автоматизації, забезпечення високої надійності та гарячої заміни, розширення функцій контролю і діагностики, зниження вартості.

#### **4.5.3. Комп'ютери в системах автоматизації**

Попри традиції застосування ПЛК для вирішення проблем автоматизації, багато з них ефективніше вирішуються за допомогою ПК замість контролера. Комп'ютер може бути використано також як пульт оператора (диспетчера) або виконувати одночасно функції контролера і пульта оператора. Для автоматизації широко застосовують як офісні, так і промислові комп'ютери.

**Комп'ютер замість контролера.** Комп'ютер може бути перетворений на повноцінний контролер, якщо на нього встановити систему програмування контролерів, електронний диск замість звичного жорсткого диска, плати введення–виведення або зовнішні модулі введення–виведення та сторожовий таймер (для перезавантаження комп'ютера у разі його «зависання»; слід зазначити, що комп'ютер має набагато більший, аніж контролер, час перезавантаження у разі використання офісної операційної системи Windows).

До переваг ПК у разі їх використання як контролерів належать: на порядок більший обсяг оперативної пам'яті; на порядки вища швидкодія; наявність жорсткого диска з майже необмеженим обсягом; швидкий розвиток апаратного забезпечення (модернізація комп'ютерів відбувається кожні



4...6 місяців, контролерів – через 3...5 років); у декілька разів нижча ціна; наявність значної кількості фахівців, що добре володіють ПК; підтримка комп'ютером *DVD* і *CD-ROM* дисководів, принтера, звукових карт, систем розпізнавання та синтезу мови, систем розпізнавання зображень і тексту, а також інших засобів, недоступних для контролера; легка заміна комп'ютера на потужніший без зміни програмного забезпечення; підтримка клавіатури, миші та монітора; можливість комплектації комп'ютера з частин, вироблених багатьма незалежними виробниками; можливість створення усієї системи автоматизації за допомогою *SCADA*-пакетів (наприклад, *MasterSCADA*) без залучення систем програмування контролерів і засобів зв'язку контролера з комп'ютером; наявність стандартів на шини, що забезпечує велику кількість незалежних постачальників стандартних комп'ютерних плат.

Хоча промислові комп'ютери, наближаючись за умовами експлуатації до контролерів, втрачають деякі з переваг ПК (такі, як швидкодія, швидкість модернізації, низька ціна), інші переваги ПК роблять їх поширеними та затребуваними в промисловості.

**Промислові комп'ютери.** Промислові комп'ютери істотно відрізняються від офісних за конструктивними ознаками, проте використовують ті ж мікропроцесори й архітектуру. Основні відмінності такі: рознімачі для змінних плат встановлюються на пасивній об'єднувальній панелі, а не на материнській платі; для змінних плат використовуються надійні штиркові рознімачі; для зміни плат не треба розкривати корпус; використовуються спеціалізовані промислові комп'ютерні шини; замість жорсткого диска може бути використана флеш-пам'ять; наявність сторожового таймера; використання вентиляторів зі змінним пиловловлювальним фільтром або відсутність вентиляторів; міцна носійна конструкція з надійним кріпленням плат пружинними планками з гвинтовими затискачами; використання блоків живлення підвищеної надійності, із захистом від короткого замикання на виході та з розширеним діапазоном мережевої напруги (100...250 В); резервування блоків живлення; наявність енергонезалежної оперативної пам'яті (з акумуляторним живленням), яка зберігає дані у разі перебоїв живлення; в одному конструктиві й на одній об'єднувальній шині може розміщуватися декілька комп'ютерних систем; наявність знімної флеш-пам'яті; застосування, окрім Windows, операційних систем DOS, Linux і операційних систем реального часу.

Конструктивне виконання промислового комп'ютера забезпечує захист від пилу, вологи, вібрації, електромагнітних наведень і полегшує технічне обслуговування. Для роботи в діапазоні температур мінус 40...70 °С використовується індустриальна елементна база з розширеним температурним діапазоном або, якщо це можливо, застосовується штучне підігрівання або примусове охолодження. Монтаж промислового комп'ютера може бути виконано у стандартній 19-дюймовій стійці, на панелі, на столі, на стіні,

на *DIN*-рейці та в спеціалізованому конструктиві. Органи керування промисловим комп'ютером (кнопки скидання і живлення та клавіатура) можуть зачинятися дверцятами з ключем.

За швидкодією та обсягом пам'яті промислові комп'ютери завжди поступаються офісним, що пов'язано з великою тривалістю розробки нових модифікацій: за час розробки промислового комп'ютера встигають змінитися декілька поколінь офісних ПК. Це пояснюється значно меншою ємністю ринку промислових комп'ютерів порівняно з офісними, яка визначає розмір інвестицій в нові проекти.

Переважає більшість промислових комп'ютерів належать до магістрально-модульних систем. Вони не мають об'єднувальної материнської плати, замість неї використовується пасивна крос-плата (об'єднувальна плата), що містить тільки рознімачі, сполучені спільною магістраллю. Усі плати комп'ютера вставляються в корпус спереду і закріплюються планками з амортизаторами для підвищення вібростійкості. Це зроблено для зручності заміни плат під час обслуговування. Плати з'єднуються з крос-платою за допомогою штиркових рознімачів, які набагато надійніші за друковані рознімачі в офісних ПК.

Значного поширення в промисловій автоматизації набули також одноплатні комп'ютери. Основні їх переваги – відсутність рознімачів, малі габарити, наприклад 90×96 мм для стандарту *PC/104* або з форм-фактором 2,5" (100×66 мм), 3,5" (102×144 мм) та 5,25" (260×180 мм), помірно енергоспоживання.

#### **4.5.4. Режими використання електронних обчислювальних машин у системах керування**

Основні режими використання ЕОМ у системах керування технологічними процесами такі: режим «радника», супервізорний режим і режим прямого цифрового керування.

**Режим «радника».** У цьому режимі (рис. 3.8) на основі діагностування стану технологічного об'єкта керування ТОК порівнянням отриманих від датчиків  $D_1 \dots D_n$  через пристрій зв'язку з об'єктом керування ПЗО-1 (до його складу входять різні перетворювачі – пневмоелектричні, нормувальні, аналого-цифрові тощо) поточних значень  $y_1 \dots y_n$  керованих параметрів з їх заданими значеннями  $y'_{1зд} \dots y'_{nзд}$  керувальна ЕОМ (КЕОМ – це може бути міні- чи мікро-ЕОМ або мікропроцесорний контролер) формує рекомендації техперсоналу щодо керування ТОК.

Техперсонал приймає рішення щодо доцільності використання цих рекомендацій і впливає на об'єкт керування зміненням уставок (завдань)  $y'_{1зд} \dots y'_{nзд}$  (в окремих випадках вони можуть дещо відрізнятися від значень  $y_{1зд} \dots y_{nзд}$ ) локальним регулятором  $P_1 \dots P_n$ .

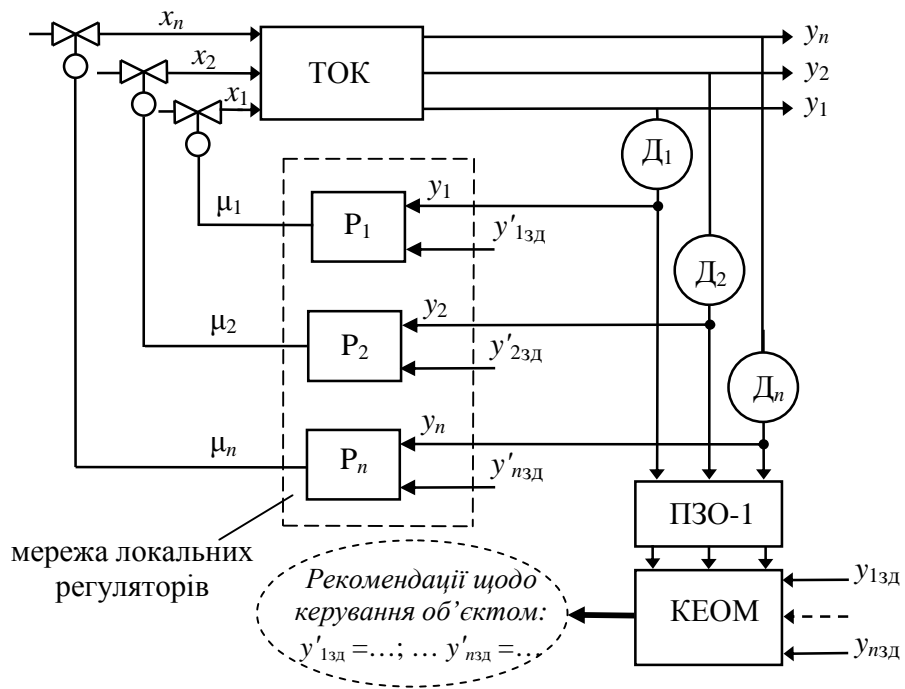


Рис. 3.8. Схема системи керування з керувальною ЕОМ у режимі «радника»

**Супервізорний режим.** На основі діагностування стану об'єкта керування (рис. 3.9) КЕОМ сама формує і здійснює керувальні впливи на об'єкт змінюванням уставок (завдань)  $y'_{1зд} \dots y'_{nзд}$  локальним регуляторам  $P_1 \dots P_n$  через ПЗО-2, що містить цифро-аналогові та електропневматичні перетворювачі.

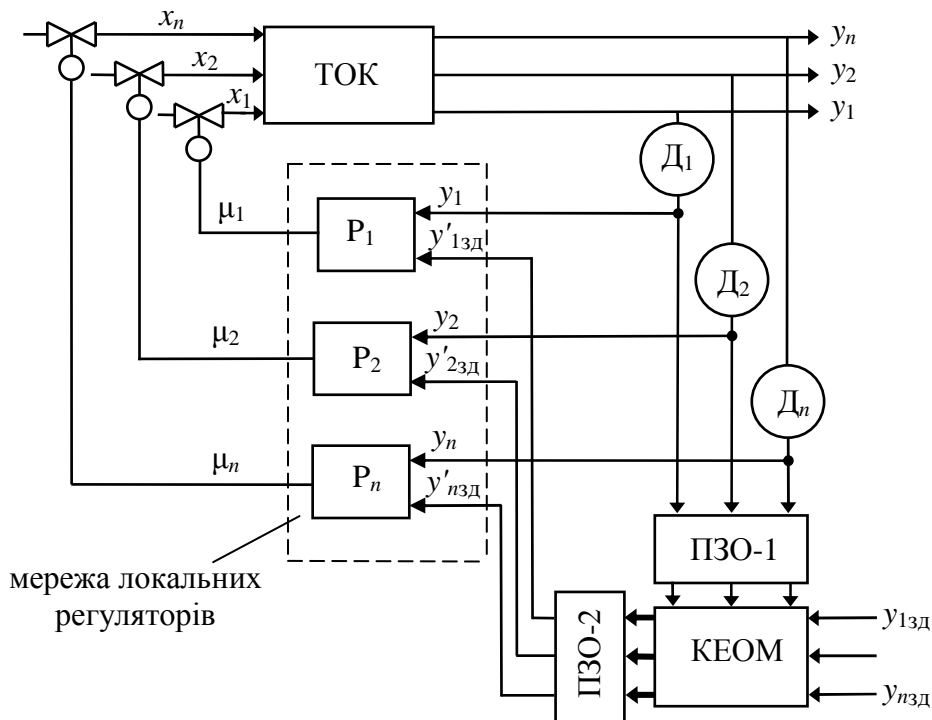


Рис. 3.9. Схема системи керування з КЕОМ у супервізорному режимі

**Режим прямого цифрового керування.** За використання ЕОМ у режимі прямого цифрового керування локальних регуляторів немає. КЕОМ формує регулювальні впливи  $\mu_1 \dots \mu_n$  і спрямовує їх безпосередньо на об'єкт керування через ПЗО-2 та відповідні ВМ і РО. Для цього ПЗО-2 має містити цифро-аналогові перетворювачі, силові електричні ланцюги (наприклад, контактори, магнітні пускачі, тиристорні підсилювачі тощо), якщо в системі керування використовується електропривід, а також електропневматичні перетворювачі – у разі використання в системі керування пневмоприводу. Очевидно, що вимоги до надійності керувальної підсистеми в останньому режимі стрімко збільшуються. Вона має враховувати всі можливі варіанти роботи ТОК і не допускати виходу його у нестійку зону, в якій можливе виникнення аварійних ситуацій.

Серед зазначених режимів найбільш поширений режим «радника»; за реалізації цього режиму зменшується можливість неправильних рішень з боку оперативного персоналу, що ґрунтуються на неповній інформації чи прийнятті за непередбачених алгоритмами обставин.

#### **4.6. ПРИСТРОЇ ЗВ'ЯЗКУ ЕЛЕКТРОННИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ МАШИН З ОБ'ЄКТАМИ КЕРУВАННЯ**

Пристрої зв'язку з об'єктами керування по суті є інтерфейсом між процесором ПЛК або КЕОМ і реальним світом. Вони потрібні як для введення вимірювальної інформації від первинних вимірювальних перетворювачів (датчиків), так і для виведення вироблених командних сигналів, які забезпечують функціонування керованого об'єкта в заданому режимі, тому зазвичай їх називають пристроями (модулями) введення–виведення.

До складу пристроїв введення зазвичай входять різні перетворювачі: пневмоелектричні, нормувальні, аналого-цифрові, а також відповідний інтерфейс зв'язку (найчастіше – RS-485), а до складу пристроїв виведення – цифро-аналогові перетворювачі, силові електричні кола (наприклад, контактори, магнітні пускачі, тиристорні підсилювачі – див. підрозд. 2.4), якщо в системі керування використано електропривід, електропневматичні перетворювачі та позиціонери – у разі використання пневматичних виконавчих механізмів. До ПЗО можна також віднести клавіатуру, дисплей, графобудівники, різні друкувальні пристрої.

Окрім функцій введення, сучасні модулі введення–виведення можуть здійснювати певну обробку інформації, що вводиться, а також виконувати додаткові функції: компенсацію температури холодного спаю термопар, лінеаризацію нелінійних датчиків, діагностику обривання датчика, автоматичне калібрування тощо [4]. Перенесення частини функцій контролера

в модулі введення–виведення – сучасна тенденція, спрямована на збільшення ступеня розпаралелювання задач керування, забезпечення незалежності локальних модулів (які за своїми функціями наближаються до ПЛК) і зменшення потоку інформації між паралельно працюючими процесорами в модуль введення–виведення.

#### **4.6.1. Введення та виведення аналогових сигналів.**

##### **Аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі**

**Введення аналогових сигналів.** Різноманітність фізичних явищ породжує розмаїтість датчиків, для кожного з яких існує відповідний пристрій введення. Для уніфікації (зменшення кількості типів) модулів введення використовують пристрої нормування сигналів, які перетворюють вимірювану фізичну величину у відповідний стандартний електричний сигнал: 0...10 В, 0...±10 В, 1...5 В і 4...20 мА, 0...20 мА. Це дозволяє виготовити один тип універсального пристрою введення зі стандартними діапазонами для всіх типів датчиків зі стандартними вихідними сигналами.

Проте для таких датчиків, як термопари, термометри опору, тензорезистори через їх значну поширеність нормувальні перетворювачі вбудовують у самі модулі введення. З огляду на це окрім універсальних модулів введення, якими є АЦП, набули поширення спеціалізовані модулі введення сигналів термопар, термометрів опору та тензорезисторів. Модулі введення з'єднуються з процесором послідовною або паралельною шиною. У контролерах з розподіленими (віддаленими) модулями введення–виведення найбільш поширені послідовні шини на основі інтерфейсів *RS-485* і *CAN*. Перевагою паралельної шини є висока пропускна здатність, що дає змогу виконувати сканування модулів введення з високою частотою і використовувати модулі аналогового введення з тактовою частотою АЦП до 100 кГц. Проте невелика довжина паралельної шини, обмежена розсинхронізуванням окремих біт в передаваному слові, не дозволяє підключити до одного контролера більше 32 модулів. Контролери з послідовною шиною мають протилежні властивості. Крім того, вони дозволяють організувати розподілені системи збирання даних і керування.

Кола живлення модулів захищаються від неправильної полярності напруги живлення та від перевищення допустимого значення напруги живлення. Захист виконується діодами, стабілітронами, позисторами та плавкими запобіжниками. Для інтерфейсу *RS-485* використовується захист від статичної електрики, від електромагнітних імпульсів, від короткого замикання та перегрівання вихідного каскаду.

**Аналого-цифрові перетворювачі.** Призначення цих вимірювальних перетворювачів – автоматичне перетворення вимірюваної аналогової величини в дискретну, подану у вигляді цифрового коду. Відповідно до методу побудови всі АЦП можна розділити на три групи: із часоімпульсним перетворенням, із частотно-імпульсним перетворенням і порозрядного зрівноважування.

Зупинимося на першій із них, тобто на АЦП із часоімпульсним перетворенням. В основу часоімпульсного методу покладено перетворення вимірюваної величини в інтервал часу, заповнюваний імпульсами зі стабільною частотою проходження (лічильними імпульсами). Аналого-цифрові перетворювачі, що використовують цей метод, застосовуються для перетворення часового інтервалу, напруги, частоти, різниці фаз й інших величин у код.

Спрощену функціональну схему АЦП із часоімпульсним перетворенням подано на рис. 3.18. Вона містить два перетворювачі, перший з яких перетворює вхідну величину  $X$  в інтервал часу  $\Delta t$ , другий – інтервал часу  $\Delta t$  у послідовність імпульсів (цифровий код)  $N$ .

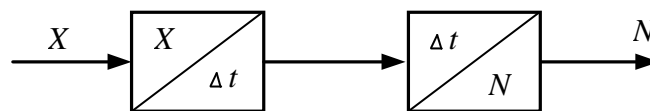


Рис. 3.18. Функціональна схема АЦП із часоімпульсним перетворенням

Якщо структура першого перетворювача може бути різною залежно від виду вхідної величини  $X$ , то структура перетворювача *часовий інтервал – код* однакова для всіх АЦП – її наведено на схемі рис. 3.19.

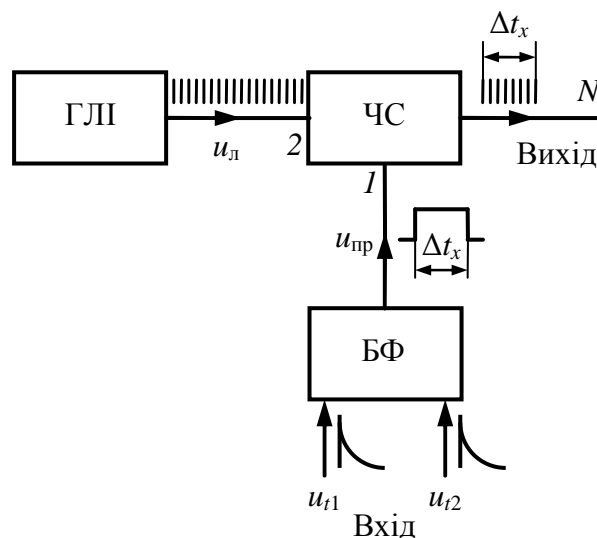


Рис. 3.19. Структурна схема перетворювача *часовий інтервал – код*

Часовий інтервал  $\Delta t_x = t_2 - t_1$  задають двома короткими імпульсами  $u_{t_1}$  і  $u_{t_2}$  – опорним (у момент часу  $t_1$ ) та інтервальним (у момент часу  $t_2$ ).

Ці імпульси надходять на блок формування  $БФ$ , який виробляє прямокутний імпульс  $u_{пр}$  тривалістю  $\Delta t_x = t_2 - t_1$ . Зазначений прямокутний імпульс подається на вхід 1 часового селектора  $ЧС$ . На другий вхід 2 часового селектора від генератора лічильних імпульсів  $ГЛІ$  постійно надходить послідовність лічильних імпульсів  $u_{л}$  зі строго визначеною частотою проходження  $f_{л}$ . Лічильні імпульси можуть проходити через  $ЧС$  на вихід тільки тоді, коли  $ЧС$  відкритий прямокутним імпульсом  $u_{пр}$ , тобто впродовж часового інтервалу  $\Delta t_x$ . Оскільки період проходження лічильних імпульсів  $T_{л} = 1 / f_{л}$  вибирається набагато меншим, ніж  $\Delta t_x$ , то можна стверджувати, що кількість лічильних імпульсів  $N$ , які пройшли через  $ЧС$ , виражається формулою  $N \approx \Delta t_x / T_{л} = \Delta t_x f_{л}$ . Отже,  $\Delta t_x \approx N / f_{л}$ . Таким чином, кожному часовому інтервалу ставлять у відповідність послідовність певної кількості імпульсів на виході АЦП, тобто цифровий код.

Сумарна похибка описаного АЦП визначається такими основними чинниками: нестабільністю частоти проходження лічильних імпульсів, похибкою перетворення вимірюваного часового інтервалу в тривалість прямокутного імпульсу, що відкриває  $ЧС$ , та похибкою дискретності. Щоб практично усунути похибку, спричинену нестабільністю  $f_{л}$ , застосовують  $ГЛІ$  з кварцовою стабілізацією. Друга складова похибки зумовлена впливом завад на роботу  $БФ$ . Основний елемент  $БФ$  – тригер. На момент перекидання тригера з одного стійкого стану в інший може впливати завада, яка додається до напруги, що надходить на вхід  $БФ$ . З огляду на це тривалість прямокутного імпульсу, що впливає на  $ЧС$ , може дещо відрізнятись від часового інтервалу  $\Delta t_x$ . Ця відмінність призводить до похибки, яка має випадковий характер. Для її зменшення слід по можливості збільшувати відношення *сигнал / завада* на вході  $БФ$ .

Третя складова похибки – наслідок того, що числове значення часового інтервалу  $\Delta t_x$  безперервної аналогової величини замінюється цілим числом періодів  $T_{л}$ . Оскільки інтервал  $\Delta t_x$  у загальному випадку не кратний  $T_{л}$ , то виникає похибка дискретності  $\Delta_d$ , абсолютне значення якої не перевищує тривалості періоду проходження лічильних імпульсів:  $|\Delta_d| < T_{л}$ . Є різні способи зменшення похибки дискретності. Найбільш прямий пов'язаний зі збільшенням частоти проходження лічильних імпульсів; істотному просуванню в цьому напрямку перешкоджають технічні складності створення високочастотної апаратури. Застосовують також синхронізацію лічильних імпульсів з початком дискретизувального часового інтервалу; це дає змогу вдвоє зменшити значення похибки дискретності. Використовують й інші способи – більш складні, але і більш ефективні.

Дуже просто й швидко аналого-цифрове перетворення виконується в паралельному (або спалаховому) АЦП, що є одним із найпоширеніших. Ці елементи приладів виготовляють у формі інтегральних схем; вони виріз-

няються високою швидкістю перетворення. Структурну схему паралельного АЦП показано на рис. 3.20.

В АЦП використовують кілька окремих елементарних компараторів  $I$ , які зіставляють аналоговий сигнал з деякою кількістю опорних напруг, кожна з яких відповідає певному рівню квантування. Залежно від розрядності  $n$  цифрового слова розраховують кількість напруг  $i$ , відповідно, компараторів:  $2^n - 1$ . Так, для трирозрядного цифрового слова (як це показано на рис. 3.20) має застосовуватися  $2^3 - 1 = 7$  опорних напруг, а отже, і сім компараторів.

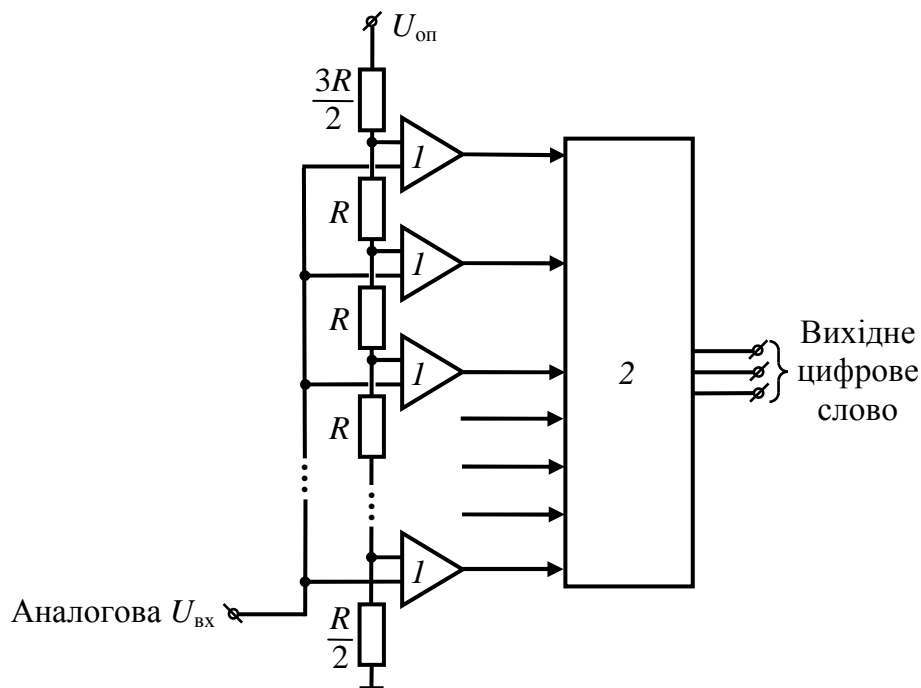


Рис. 3.20. Схема паралельного АЦП:  $1$  – компаратор;  $2$  – шифратор

Точність перетворення визначається винятково точністю опорних напруг, створюваних за допомогою ланцюжка резисторів  $R_i$ , підключених до джерела загальної опорної напруги. Шифратор у паралельному АЦП використовує виходи компараторів для перетворення їх безпосередньо в цифровий двійковий вихідний сигнал.

**Виведення аналогових сигналів.** Модулі аналогового виведення призначені для виведення з комп'ютера або контролера інформації в аналоговій формі. Аналогові сигнали на виході модулів виведення можуть бути подані у вигляді стандартних сигналів струму ( $0...20$  і  $4...20$  мА) або напруги ( $0...5$  і  $\pm 10$  В). Модулі аналогового виведення використовують переважно для керування виконавчими пристроями з аналоговим керувальним входом.

Похибка модуля виведення має такі основні складові: похибка дискретності цифро-аналогового перетворювача; стабільність джерела опорної напруги; внутрішній шум модуля; ненульовий вихідний опір. Похибка типового



модуля виведення становить 0,1 % від верхньої межі діапазону ( $\pm 10$  В для потенціального виходу і 0...20 мА для струмового).

**Цифро-аналогові перетворювачі.** У цифрових системах автоматичного керування (нерідко й у схемах цифрових вимірювальних приладів) використовують операції перетворення цифрового коду в аналогову величину, однорідну з вимірюваною, які реалізують за допомогою ЦАП. Їх також часто встановлюють у колах зворотного зв'язку різних інформаційно-вимірювальних систем.

На рис. 3.21 подано схему ЦАП вагового типу. Резистори  $R_1, R_2, \dots, R_n$  підбирають так, щоб їх електропровідності співвідносилися як вагові коефіцієнти керувального двійкового коду, тобто щоб

$$(1/R_n) / (1/R_{n-1}) = (1/R_{n-1}) / (1/R_{n-2}) = \dots = (1/R_1) / (1/R_2) = 2.$$

У цьому разі вихідна напруга матиме значення

$$U_{\text{вих}} = AE \sum_{i=1}^n k_i 2^{i-1},$$

де  $A$  – коефіцієнт пропорційності;  $E$  – зразкова напруга;  $n$  – кількість розрядів керувального двійкового коду, що надходить на входи  $a_1, a_2, \dots, a_n$ ;  $i$  – номер розряду;  $k_i$  – розрядний коефіцієнт, що може набувати значення 0 або 1 залежно від положення ключа  $S_i$ .

У свою чергу, положення ключів керується кодовими імпульсами, що надходять на входи  $a_1, a_2, \dots, a_n$ . У результаті цифровий код виявляється перетвореним у пропорційну аналогову напругу  $U_{\text{вих}}$ .

Зведена похибка ЦАП становить близько 0,1 %.

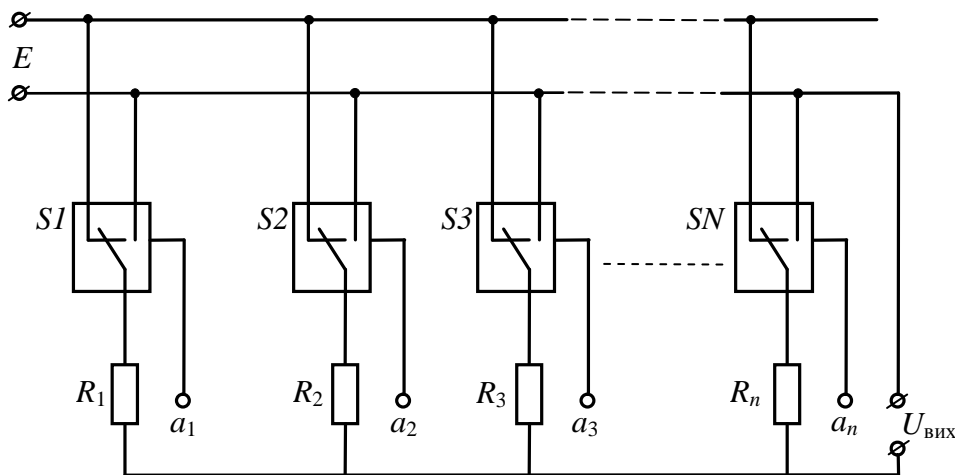
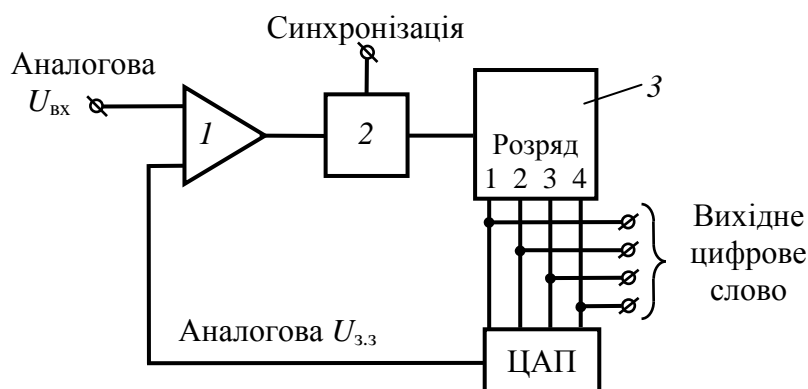


Рис. 3.21. Спрощена схема ЦАП вагового типу

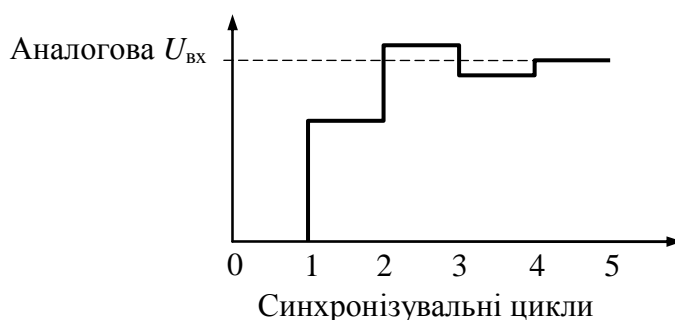
Для підвищення точності перетворення аналогового сигналу вимірювального пристрою в цифровий код до рівня, прийнятного для вимірювальних

систем, ЦАП часто встановлюють у лінії зворотного зв'язку різних інформаційно-вимірювальних систем. Аналого-цифрові перетворення виконують переважно із використанням принципу послідовного наближення: спочатку здійснюють грубе перетворення аналогового сигналу в цифровий, потім його знову перетворюють в аналоговий (цифро-аналогове перетворення саме по собі просте) і порівнюють отримане значення з первинним. Якщо первинне значення більше від отриманого в ході подвійного перетворення аналогового сигналу, то цифрове значення збільшується, якщо менше – то зменшується. Так триває доти, доки первинне значення аналогового сигналу не збіжиться з отриманим у ході подвійного перетворення.

Структурну схему такого АЦП показано на рис. 3.22, а. Сигнал від компаратора 1 прикладається до регістра 3 з керувальною логікою. У вимкненому стані регістр обнуляється і на виході ЦАП напруги немає. У результаті цього виникнення будь-якої аналогової напруги  $U_{\text{вх}}$  на вході компаратора зумовить появу на його виході логічної одиниці.



а



б

Рис. 3.22. Аналого-цифровий перетворювач послідовного наближення:

а – схема АЦП; б – часова діаграма;

1 – компаратор; 2 – блок керувальної логіки; 3 – регістр

Тактові імпульси, впливаючи на блок керувальної логіки 2, зумовлюють зміну молодшого розряду регістра 3 на одиницю, внаслідок чого

вихідний сигнал ЦАП збільшується. Компаратор  $I$  здійснює порівняння аналогових напруг на вході ( $U_{вх}$ ) і на виході ЦАП (сигнал зворотного зв'язку  $U_{3.3}$ ).

Якщо напруга на вході все ще вища за напругу на виході ЦАП, то вихід компаратора залишається в стані логічної одиниці. Тоді черговий тактовий імпульс блока керувальної логіки змінює на одиницю наступний розряд регістра. У такий спосіб відбувається зміна кожного його розряду.

Коли аналогова вхідна напруга  $U_{вх}$  після якого-небудь кроку стане меншою від вихідної напруги ЦАП ( $U_{3.3}$ ), блок керувальної логіки встановлює останній розряд у нуль перш, ніж відбудеться зміна наступного розряду на одиницю, і процес порівняння триває. На рис. 3.22, б зображено відповідну описаному пристрою часову діаграму. Слід зазначити, що тривалість перетворення будь-якого вхідного аналогового сигналу в  $n$ -розрядному перетворювачі дорівнює тривалості  $n$  періодів тактових імпульсів.

#### 4.6.2. Введення та виведення дискретних сигналів

У системах автоматизації дуже поширені двійкові сигнали («0–1», «увімкнено–вимкнено»), які надходять від кінцевих вимикачів, датчиків охоронної або пожежної сигналізації, датчиків заповнення резервуарів, датчиків переміщення стрічки на конвеєрі, датчиків наближення тощо.

**Введення дискретних сигналів.** Модулі введення дискретних сигналів у промисловій автоматизації мають декілька різних типів входів:

– вхід типу «сухий контакт» (таким у системах автоматизації називають джерело інформації, що не має вбудованого джерела енергії, наприклад контакти реле; для передачі інформації про стан такого контакту необхідне зовнішнє джерело струму або напруги);

– дискретний вхід для логічних сигналів у формі напруги;

– вхід дискретних сигналів 110...220 В.

Дискретні входи гальванічно розв'язані від решти модуля введення. Зазвичай розв'язка виконується за допомогою оптронів з двома випромінювальними діодами, увімкненими зустрічно-паралельно. Це забезпечує можливість підключення до входів дискретних сигналів будь-якої полярності.

**Виведення дискретних сигналів.** Виведення дискретних сигналів використовується для керування станом увімкнено (вимкнено) виконавчих пристроїв. Пристрої виведення дуже різноманітні. Знання структури вихідних каскадів потрібне для правильного їх застосування.

Найкраще рішення для побудови дискретних виходів – мікросхеми інтелектуальних ключів, які містять не лише потужний транзистор, але і кола його захисту від перевантаження за струмом і напругою, короткого замикання, переполюсування та перегрівання, а також електростатичних розрядів. У разі

перегрівання вихідного каскаду або перевищення струму навантаження інтелектуальний ключ вимикається.

### 4.6.3. Перехідні (узгоджувальні) перетворювачі

Переважна більшість технічних засобів Державної системи промислових приладів і засобів автоматизації, використовуваних для контролю та керування хіміко-технологічними процесами, належать до двох гілок – пневматичної або електричної. Для здійснення переходу між цими двома енергетичними гілками призначені так звані *перехідні* або *узгоджувальні* (їх також називають *міжсистемними*) перетворювачі – аналогові та дискретні. Електропневматичні перетворювачі дискретної дії призначені для керування пневматичними колами сигналізації та позиційного регулювання технологічних параметрів за допомогою пневматичних сигналів, пневмоелектричні – за допомогою електричних. Аналогові перетворювачі призначені для перетворення безперервних уніфікованих сигналів одного виду в безперервні уніфіковані сигнали другого. Електропневматичні та пневмоелектричні перетворювачі можуть виступати як пристроями введення так і пристроями виведення.

Розглянемо будову та принцип роботи деяких перетворювачів.

*Пневмоелектричний перетворювач ППЕ-2* призначений для перетворення безперервного уніфікованого пневматичного сигналу в безперервний уніфікований сигнал постійного струму. Принципову схему перетворювача наведено на рис. 3.15. Частина струму  $I_{\text{вих}}$  вводять в обмотку зворотного зв'язку ОЗЗ. У контурі «тригер Т – обмотка ОЗБ – опір  $R$ » виникають автоколивання струму, середнє значення і знак яких пропорційні величині та напрямку переміщення плунжера 2 і вихідному струму  $I_{\text{вих}}$ . Параметрами налагодження перетворювача служать змінний опір  $R_1$  і коректор нуля в підсилювачі П (на схемі не показаний).

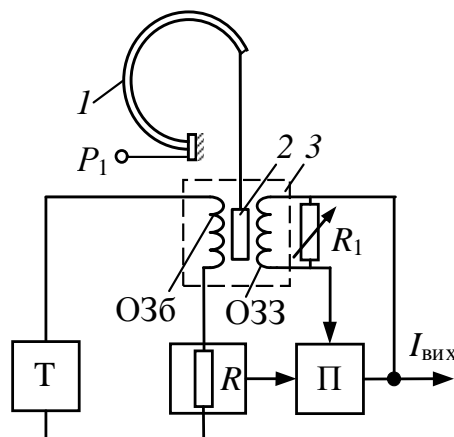


Рис. 3.15. Схема пневмоелектричного перетворювача ППЕ-2:  
 1 – манометрична трубка; 2 – плунжер; 3 – керований дросель;  
 ОЗБ і ОЗЗ – обмотки збудження та зворотного зв'язку;  
 П – підсилювач; Т – тригер Шмітта

Пневмоелектричний перетворювач вибухозахисний ПЕВ-1 призначений для перетворення дискретного пневматичного сигналу в межах від 0 до 0,6 МПа у дискретний електричний сигнал в автоматизованих системах керування технологічними процесами. Перетворювач складається з комутувального елемента 2 (рис. 3.16, а) та вмонтованого у корпус 1 приводного пристрою, що складається з мембрани 3, штовхача 4, постійного магніту 5 і пружини 6. Комутувальний елемент виконано у вигляді перемикального геркона (магнітнокеровані герметизовані контакти).

Якщо тиску повітря на вході немає, геркон перебуває поза магнітним полем, яке створюється постійним магнітом 5. За таких умов контакти 1 і 2 (рис. 3.16, б) замкнені, а контакти 2 і 3 розімкнені.

У разі надходження пневматичного сигналу на вхід перетворювача мембрана 3 zdeформується і за допомогою штовхача 4 перемістить постійний магніт 5 так, що геркон 2 опиниться в межах дії магнітного поля. Зі спрацьовуванням геркона контакти 1 і 2 розімкнуться, а контакти 1 і 3 замкнуться. Зі зняттям тиску повітря на вході штовхач 4 і постійний магніт 5 пружиною 6 повернуться до початкового стану, при цьому контакти 1 і 2 знову замкнуться, а контакти 1 і 3 – розімкнуться.

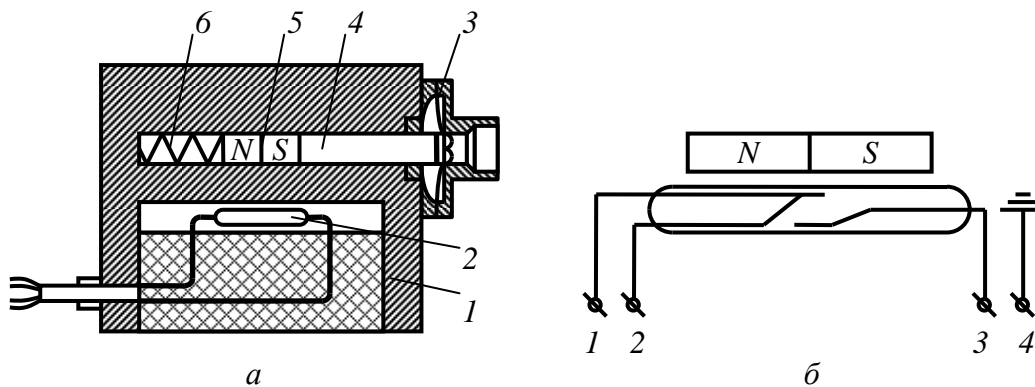


Рис. 3.16. Перетворювач ПЕВ-1: а – конструкція; 1 – корпус; 2 – комутувальний елемент (геркон); 3 – мембрана; 4 – штовхач; 5 – постійний магніт; 6 – пружина; б – принципова схема; 1, 2, 3, 4 – контакти геркона

Перетворювач працює за температури навколишнього повітря – 40...70 °С та відносної вологості до 100 %. Тиск спрацьовування не перевищує 0,01 МПа.

Перетворювач пневмоелектричний АСТРА-8М забезпечує перетворення уніфікованих пневматичних аналогових сигналів 20...100 кПа в уніфіковані електричні аналогові струмові сигнали 0...5 або 0(4)...20 мА для введення в керувальну ЕОМ або в мікропроцесорні контролери. Кількість каналів перетворення – 8. Оснащений сигналізуювальним пристроєм (кількість контактів для комутації –16). Має вихідний інтерфейс RS-232 та RS-485. Клас точності перетворювача 0,5. Допустима зведена

похибка спрацьовування сигналізувального пристрою – 1 %. Відхилення температури навколишнього повітря від 20 °С у межах робочих температур (10...60 °С) зумовлює додаткову похибку 0,45 % на кожні 10 °С зміни температури.

Перетворювач електропневматичний типу ЕПП-М (рис. 3.17) призначений для перетворення уніфікованого сигналу постійного струму 0...5 або 0(4) ...20 мА у пропорційний пневматичний аналоговий сигнал 20...100 кПа. Клас точності – 1,5.

Дія перетворювача ґрунтується на принципі силової компенсації. Вхідний струм  $I_{\text{вх}}$ , що проходить через котушки електромагніта поляризованого типу, утворює у магнітопроводі 9 магнітний потік, внаслідок чого на якорі 8 виникає сила  $N_{\text{вх}}$ , прямо пропорційна величині вхідного струму.

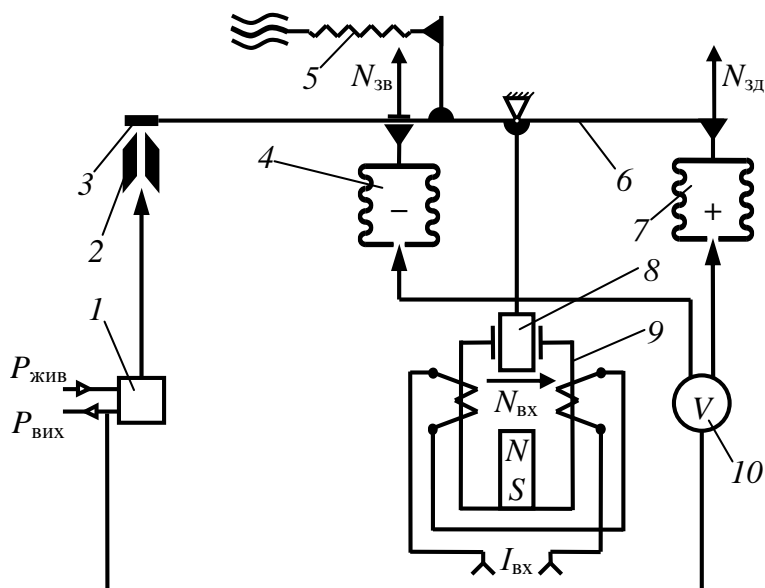


Рис. 3.17. Принципова схема електропневмоперетворювача ЕПП-М:  
 1 – пневматичне реле; 2 – сопло; 3 – заслінка; 4, 7 – від’ємний і додатний сильфони зворотного зв’язку; 5 – пружина встановлення початкового значення діапазону перетворення; 6 – важіль; 8, 9 – якорі і магнітопровід електромагніта поляризованого типу; 10 – пневматична посудина

Зі зміною вхідного струму момент  $M_{\text{вх}}$ , утворений силою  $N_{\text{вх}}$ , буде повертати важіль 6, змінюючи відстань між соплом 2 і закріпленою на кінці важеля заслінкою 3 – це зумовить відповідну зміну тиску в лінії сопла 2. Підсилений пневматичним реле 1 цей сигнал тиску у вигляді  $P_{\text{вих}}$  надходить на вихід перетворювача.

Одночасно буде змінюватись тиск у сильфонах додатного 7 і від’ємного 4 зворотних зв’язків, спричинюючи появу сил зворотного зв’язку – додатного  $N_{\text{зд}}$  та від’ємного  $N_{\text{зв}}$ . Ці зміни триватимуть доти, доки моменти зворотного зв’язку, утворені силами  $N_{\text{зд}}$  та  $N_{\text{зв}}$ , що виникають у сильфонах 7 і 4

від дії тиску вихідного сигналу  $P_{\text{вих}}$ , зрівноважать на важелі  $\delta$  дію моменту  $M_{\text{вх}}$  від вхідного сигналу  $I_{\text{вх}}$ . Із досягненням стану рівноваги рух важеля  $\delta$  припиниться, і на виході перетворювача сформується пневмосигнал  $P_{\text{вих}}$ , величина якого буде пропорційною величині вхідного струму  $I_{\text{вх}}$ :

$$P_{\text{вих}} = KI_{\text{вх}},$$

де  $K$  – коефіцієнт передачі електропневматичного перетворювача.

Пневматична посудина  $10$  виконує роль демпфера для гасіння пневмоколивань, а пружина  $5$  служить для налагодження початкового значення вихідного сигналу  $P_{\text{вих}} = 0,02$  МПа за відповідного значення вхідного електричного струмового сигналу, тобто початку діапазону перетворення. У перетворювачі передбачено компенсацію температурної похибки електромагніта.

#### **4.7. Керувально-обчислювальні комплекси на базі мікро-ЕОМ**

Останнім часом стрімкого розвитку в мікроелектроніці набув напрям, пов'язаний із випуском однокристальних мікроконтролерів, призначених для «інтелектуалізації» різного устаткування. Однокристальні мікроконтролери конструктивно виконані у вигляді великих інтегральних схем (ВІС) і включають усі складові частини звичайної мікро-ЕОМ: мікропроцесор, пам'ять програм і пам'ять даних, а також програмовані інтерфейсні схеми для зв'язку із зовнішнім технічним середовищем. Використання мікроконтролерів у системах керування забезпечує досягнення виключно високих показників ефективності за такої низької вартості (у багатьох застосуваннях система може складатися тільки з однієї ВІС мікроконтролера), що мікроконтролерам, мабуть, немає розумної альтернативної елементної бази для побудови керувальних і регульовальних систем, тож у майбутньому вони набуватимуть дедалі ширшого застосування.

**Контролери малоканальні багатofункціональні регульовальні мікропроцесорні «Реміконт Р-130».** Десятки тисяч малоканальних мікропроцесорних контролерів «Реміконт Р-130» (далі – Р-130) використовують у різних галузях: енергетиці, хімії, нафтохімії, машинобудуванні, будівельній індустрії, целюлозно-паперовій промисловості. Вони призначені для створення сучасних автоматизованих систем керування технологічними процесами (АСК ТП) і дозволяють виконувати оперативне керування з використанням персональних ЕОМ, автоматичне регулювання, автоматичне логіко-програмне керування, автоматичне керування зі змінною структурою, захист і блокування, сигналізацію, реєстрацію подій. За допомогою Р-130 можна реалізувати одноконтурні, каскадні, програмні, супервізорні та багатозв'язкові АСР, а також системи логіко-програмного керування з послідовною дією команд. Завдяки їх малоканальності забезпе-

чується економічне керування невеликими агрегатами та висока «живучість» складних систем керування.

Випускають три базові моделі Р-130: регулювальну (мод. 01), логічну (мод. 02) і безперервно-цифрову (мод. 23).

*Регулювальна модель.* Вона призначена для вирішення завдань автоматичного регулювання і дає змогу виконувати локальне, каскадне, програмне, супервізорне, багатозв'язкове керування. Завдяки структурі цієї моделі можна вручну чи автоматично вмикати, вимикати, перемикати та реконфігурувати контури регулювання. Всі ці операції виконуються безударно, незалежно від складності структури керування. У поєднанні з обробкою цифрових сигналів ця модель дає змогу виконувати також логічні перетворювання сигналів і видавати не лише аналогові чи імпульсні, а й цифрові команди керування.

За допомогою регулювальної моделі можна реалізувати до чотирьох незалежних контурів регулювання, кожен з яких може бути локальним чи каскадним, з аналоговим чи імпульсним виходом, з ручним, програмним чи супервізорним задавачем. Модель уміщує 76 зашитих у ПЗП алгоритмів безперервної та цифрової обробки інформації, до яких входять алгоритм ПД-регулювання, математичних, динамічних, нелінійних, аналого-цифрових і логічних перетворювань. Крім того, модель має 99 алгоблоків з можливістю вільного їх заповнення різними алгоритмами з бібліотеки та конфігурування алгоблоків між собою й із входами-виходами мікроконтролера.

На базі цієї моделі можна здійснювати ручне встановлювання чи автопідстроювання будь-яких коефіцієнтів налагодження в різних алгоритмах, безударну зміну режимів керування та безударне вмикання, вимикання, перемикування, реконфігурування контурів регулювання будь-якого ступеня складності, оперативне керування контурами регулювання за допомогою 12 клавіш, двох чотирирозрядних цифрових індикаторів і набору світлодіодів, які дають змогу змінювати режими, встановлювати завдання, керувати виконавчими механізмами (ВМ), контролювати сигнали, показувати аварійні ситуації, вибрати необхідну програму для програмного регулювання, запускати, зупиняти та скидати програми, переходити до наступних ділянок програм, а також контролювати перебіг виконання програм.

*Логічна модель* призначена для реалізації логічних програм крокового керування. Вона дає змогу формувати логічну програму крокового керування з аналізом умов виконання кожного кроку. В поєднанні з обробкою аналогових сигналів ця модель дає змогу виконувати також різноманітні функціональні перетворювання аналогових сигналів і виробляти не лише цифрові, а й аналогові керувальні сигнали. За допомогою логічної моделі можна реалізувати чотири незалежні логічні програми



крокового керування, кожна з яких може бути лінійною (виконується послідовно крок за кроком) чи розгалуженою з безумовним чи умовним переходами. Ця модель дозволяє здійснювати до 87 етапів програми з можливістю реалізації на кожному етапі до 20 кроків. На кожному з кроків задаються умови його виконання, контрольний час, упродовж якого аналізуються умови та визначається поведінка програми у випадку, коли ці умови не виконуються. Інші можливості моделі переважно аналогічні попередній.

*Безперервно-цифрова модель* призначена для вирішення змішаних завдань регулювання та логіки і дає змогу виконувати різноманітні перетворення як аналогових, так і цифрових сигналів.

За допомогою цієї моделі можна реалізувати: одну логічну програму крокового керування, що вміщує до дев'яти кроків; чотири контури регулювання з аналоговим виходом чи вісім контурів імпульсного або позиційного регулювання. Інші функціональні можливості моделі переважно аналогічні попереднім.

Усі моделі Р-130 мають засоби оперативного керування, розміщені на лицьовій панелі контролера, за допомогою яких можна вручну змінювати режими роботи, встановлювати завдання, керувати ходом виконання програм, вручну керувати виконавчими пристроями, контролювати сигнали та індикувати помилки. Стандартні аналогові й цифрові датчики, виконавчі пристрої підключаються до Р-130 за допомогою індивідуальних кабельних зв'язків.

Контролери Р-130 дозволяють здійснювати об'єднання в кільцеву мережу «Транзит», реалізовану на основі послідовного інтерфейсу ІРПС («струмова петля»). Контролер має проектне компонування, яке дає змогу користувачеві вибрати потрібний набір модулів і блоків згідно з кількістю та видом вхідних/вихідних сигналів. До складу Р-130 (рис. 4.21) [7] входять блок контролера БК-1 і низка додаткових блоків, що розширюють його можливості.

Блок контролера БК-1 перетворює аналогові й дискретні сигнали в цифрову форму, а також здійснює зворотні перетворення, оброблює інформацію в цифровій формі та забезпечує обслуговування лицьової панелі (ЛП) і пульта налагодження (ПН).

До основної частини блока контролера входять:

- модуль процесора ПРЦ-10, призначений для обробки інформації, що надходить із інших модулів, відповідно до заданої програми;
- модуль контролю та програмування МКП-10, який обслуговує клавіатуру й індикатори лицьової панелі та пульта налагодження;
- модуль стабілізованої напруги МСН-10, що забезпечує стабілізованим живленням увесь блок контролера разом із пультом налагодження.

До змінної частини блока контролера входять:

- модулі ПЗО (пристрої зв'язку з об'єктом), що перетворюють

аналогові та дискретні сигнали в цифрову форму, а також здійснюють зворотні перетворення;

– лицьова панель ЛП, за допомогою якої здійснюється оперативне керування технологічним процесом.

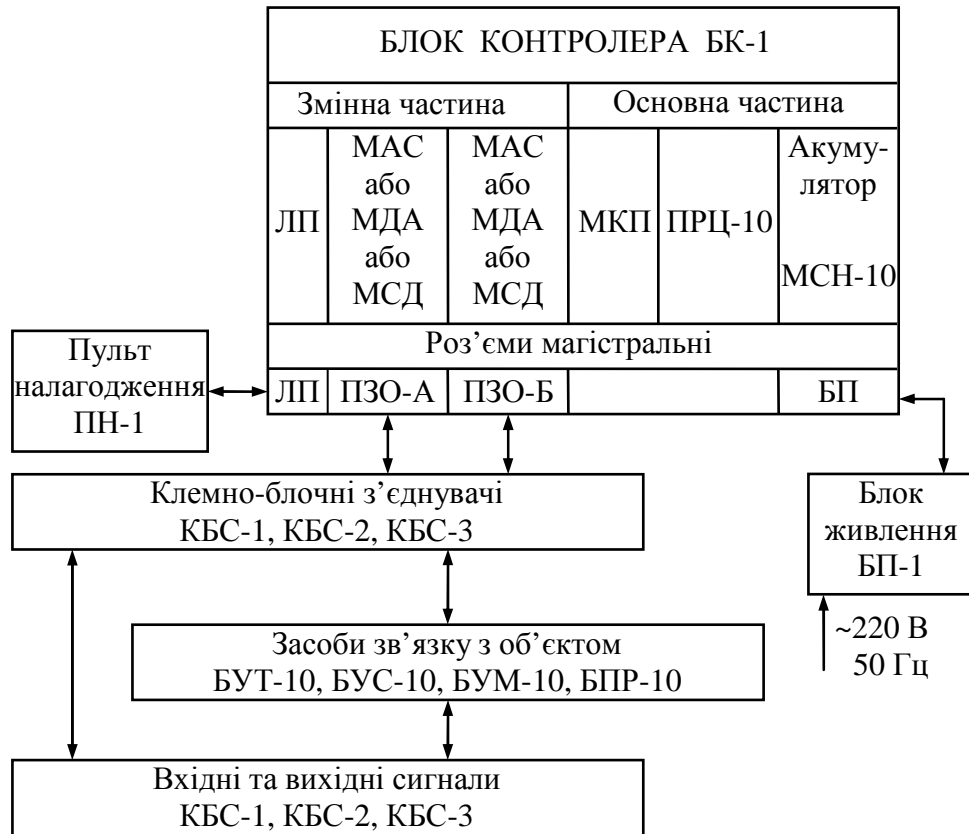


Рис. 4.21. Склад контролера «Реміконт Р-130»

Різні комбінації модулів ПЗО дають 30 модифікацій блока контролера. Контролер може працювати з такими вхідними сигналами:

- сигнали від термоелектричних перетворювачів ТХК, ТХА, ТПР, ТВР, ТПП (див. п. 4.2.6 Кн. 1);
- сигнали від термоперетворювачів опору ТОМ, ТОП (див. п. 4.2.5 Кн. 1);
- уніфіковані аналогові сигнали постійного струму 0...5, 0...20, 4...20 мА; 0...10 В;
- дискретні сигнали: логічна «1» напругою від 19 до 32 В та логічний «0» напругою від 0 до 7 В.

Уніфіковані аналогові сигнали подаються безпосередньо на клемно-блокові з'єднувачі, сполучені з блоком контролера. Сигнали від термодпар і термометрів опору заводяться в контролер через пристрої БУТ-10 та БУС-10 відповідно. Пристрої БУТ-10 і БУС-10 є підсилювачами сигналів. Вони перетворюють сигнали від термодпар і термометрів опору в уніфікований сигнал 0...5 мА. Обидва підсилювачі мають два не-

залежні канали підсилення. На виходах Р-130 можуть бути сформовані такі керувальні сигнали:

- уніфіковані аналогові сигнали постійного струму 0...5, 0...20 та 4...20 мА;

- дискретні сигнали:

- транзисторного виходу: максимальна напруга комутації 40 В і максимальний струм навантаження 0,3 А;

- сильнострумового релейного виходу: максимальна напруга комутації 220 В та максимальний струм навантаження 2 А.

Сильнострумові вихідні дискретні сигнали формуються на виході контролера за використання блока підсилювача потужності БУМ-10. Підсилювач містить чотири незалежні реле з потужними вихідними нормально розімкненими контактами. Блок перемикання БПР-10 призначений для комутації аналогових або дискретних сигналів і застосовується у разі потреби зовнішньої комутації, блокувань, перемикань.

Пульти налагодження ПН-1 призначений для технологічного програмування контролера, його статичного та динамічного налагоджування, а також для контролю сигналів у процесі налагоджування системи.

Блок живлення БП-1 перетворює мережеву напругу змінного струму 220 В у нестабілізовану напругу постійного струму 24 В, яка використовується для живлення блока контролера БК-1 і підсилювачів БУТ-10 та БУС-10, а також для живлення дискретних входів і виходів контролера.

*Мова програмування*, що використовується у Р-130, непроцедурна. Під час програмування не задається порядок виконання операцій, а створюється віртуальна (уявна) структура, яка описує інформаційну організацію контролера та характеризує його як ланку системи керування. Частина елементів віртуальної структури реалізовано апаратно: апаратура введення–виведення інформації, апаратура оперативного керування і налагодження, апаратура інтерфейсного каналу, інші – програмно, у вигляді алгоритмічних блоків (алгоблоків) і бібліотеки алгоритмів.

*Алгоблок* служить для зберігання одного з бібліотечних алгоритмів контролера. Алгоблок з розміщеним у ньому алгоритмом може розглядатися як віртуальний прилад, що виконує алгоритмічну обробку інформації відповідно до закладеного в ньому алгоритму і має відповідну кількість входів і виходів. Алгоблоки сполучаються один з одним і з входами-виходами контролера програмним способом. У Р-130 можна використовувати до 99 алгоблоків.

*Бібліотека алгоритмів* – це перелік алгоритмів керування, які можуть поміщатися в алгоблоки. Бібліотека налічує 76 алгоритмів. До її складу входять алгоритми автоматичного регулювання, динамічних перетворень, логіки, арифметичних операцій. Частина бібліотечних алгоритмів, які називаються спеціальними, виконують особливе завдання: вони поєднують

апаратуру контролера з основною масою функціональних алгоритмів. До спеціальних алгоритмів належать: алгоритми введення та виведення аналогових і дискретних сигналів; алгоритми обслуговування лицьової панелі; алгоритми прийому та передачі сигналів через інтерфейсний канал. Апаратні засоби віртуальної структури (ПЗО, лицьова панель, інтерфейсний канал) починають виконувати свої функції після того, як у будь-який алгоблок буде поміщено відповідні алгоритми.

У Р-130 вмонтовано засоби самодіагностики, сигналізації та ідентифікації несправностей, зокрема у разі відмови апаратури, виходу сигналів за припустимі межі, збою в ОЗП, порушення обміну у кільцевій мережі.

Окрім базової моделі «Реміконт Р-130» виготовляють також «Реміконт Р-130М», «Реміконт Р-130ТМ», «Реміконт Р-130ISa».

*Контролер Р-130М* є модернізацією базового контролера Р-130 і має розширені функціональні можливості. У контролері Р-130М збережено всі функціональні можливості Р-130 (з підтримкою бібліотеки алгоритмів включно) й габаритно-приєднувальні розміри. Контролер має фізичні інтерфейси ІРПС, RS-232, RS-485 і здійснює підтримку протоколів «Транзит», Modbus, Ethernet TCP/IP. У контролері Р-130М, порівняно з базовою моделлю Р-130, збільшено кількість незалежних контурів регулювання та незалежних логічних програм крокового керування до 8 (у Р-130 їх 4), а також передбачено можливість створення бібліотек власних алгоритмів.

*Контролер Р-130ТМ* – виконання контролера Р-130 із вбудованим мікромонітором реального часу й OEM-версією<sup>16</sup> інтегрованої SCADA/HMI системи Trace Mode.

*Контролер Р-130ISa* розроблено з метою подальшого вдосконалення конструкції контролерів Р-130, посилення їх конкурентних переваг відповідно до сучасних вимог, які висувають до автоматизованих систем керування та збору даних. Від Р-130 нова розробка відрізняється можливістю легшого програмування за рахунок використання алгоритмів у середовищі ISaGRAF; наявністю вбудованого програмного забезпечення; застосуванням виконавчої системи ISaGRAF target kernel 3.32; використанням бібліотеки керувальних алгоритмів Р-130; можливістю доповнення користувачем бібліотеки готових алгоритмів за допомогою мови С; наявністю операційної системи реального часу RTOS-32; відсутністю потреби застосування блока шлюзу; підтримкою мереж MODBUS по RS-232/485 і TCP/IP (Ethernet); незалежною пам'яттю у вигляді FLASH-диска (8 MB); наявністю годинника реального часу. Контролер Р-130ISa

---

<sup>16</sup> Версії програмного забезпечення, призначені для постачання разом з апаратним забезпеченням.

розроблено у межах пропозиції серії контролерної техніки нового покоління, що відповідає стандартам відкритих систем.

**Модернізований малоканальний багатофункціональний мікропроцесорний контролер Р-130М.** За час експлуатації контролера Р-130 зібрано зауваження та пропозиції від споживачів, які лягли в основу його модернізації. У новій версії контролера Р-130М збережено «самодостатність», властиву всім контролерам Р-130. Під час його програмування й експлуатації на об'єкті не вимагається додаткових засобів: комп'ютера, окремо придбаного програмного забезпечення – для них створено значну базу програмних напрацювань. Для підприємств, що вже працюють з контролерами Р-130, збережено колишні схеми їх підключення. У модернізованому варіанті Р-130М залишилися тими самими габаритно-приєднувальні розміри. Все це значно спрощує освоєння у виробництві нової моделі. Разом з перевагами попередніх модифікацій модернізований контролер Р-130М набув властивостей, що істотно підвищують його конкурентоспроможність на сучасному ринку автоматизації.

Проведено комплексну модернізацію апаратного забезпечення контролера. В першу чергу модернізації піддали процесорний модуль: у контролері Р-130М використовується *IBM*-сумісний процесор. Для сполучення контролерів Р-130 із засобами верхнього рівня використовується блок шлюзу. У моделі Р-130М потреби у цьому пристрої немає, оскільки функціональні можливості шлюзу закладені в модернізованому варіанті контролера. Крім того, є підтримка *протоколів Modbus і Ethernet TCP/IP*, яка використовується для об'єднання контролерів у мережі різного рівня.

Для модернізованого контролера розробляється *OPC*-сервер, який виконує функцію взаємодії з *SCADA*-системами. У контролері Р-130М передбачено програмування і завантаження призначених для користувача програм, а також нових версій програмного забезпечення з верхнього рівня через наявні інтерфейсні канали. Можливість ручного програмування контролера зберігається, проте з'являється нова можливість програмування з комп'ютера. На відміну від Р-130, в якому оновлення версій програмного забезпечення здійснюється лише перепрограмуванням або заміною мікросхем, що містять системну програму, в оновленому контролері можна змінювати програму завантаженням нової версії через наявні комунікаційні канали з комп'ютера.

У майбутньому планується здійснити декілька проектів модернізації.

1. Зараз випускають контролери двох модифікацій, розраховані на безперервні та дискретні процеси (аналогова і безперервно-дискретна моделі). У перспективі можливо об'єднати ці функції в одному контролері, який

зможє одночасно працювати в режимах логічної, аналогової та безперервно-дискретної моделей контролера Р-130.

2. Віддалене діагностування через інтернет – це можливість діалогу контролера через інтернет із сервісною службою розробника/виробника. Така функція дозволить у разі неполадки звернутися безпосередньо до розробників, щоб оперативно отримати інформацію про усунення проблеми.

3. Нині технологічне програмування контролера Р-130 здійснюється переведенням його в режим програмування, під час якого контролер не виконує своїх керувальних функцій. Але далеко не всі виробничі процеси можна переривати. Тому надалі заплановано ввести можливість програмування контролера під час роботи на об'єкті без переривання процесу керування.

4. Міжнародні стандарти містять п'ять мов технологічного програмування. Контролер Р-130 має мову програмування, що не відповідає цим стандартам. У перспективі планується адаптувати контролер до однієї зі стандартних мов технологічного програмування. Передбачається можливість створення бібліотек власних алгоритмів з програмуванням мовою C/C++.

*Архітектура Р-130М.* Зміни в архітектурі контролера пов'язані із застосуванням IBM-PC-сумісного процесорного модуля в стандарті PC/104. Спрощену архітектуру контролерів Р-130 і Р-130М показано на рис. 4.22 [7].

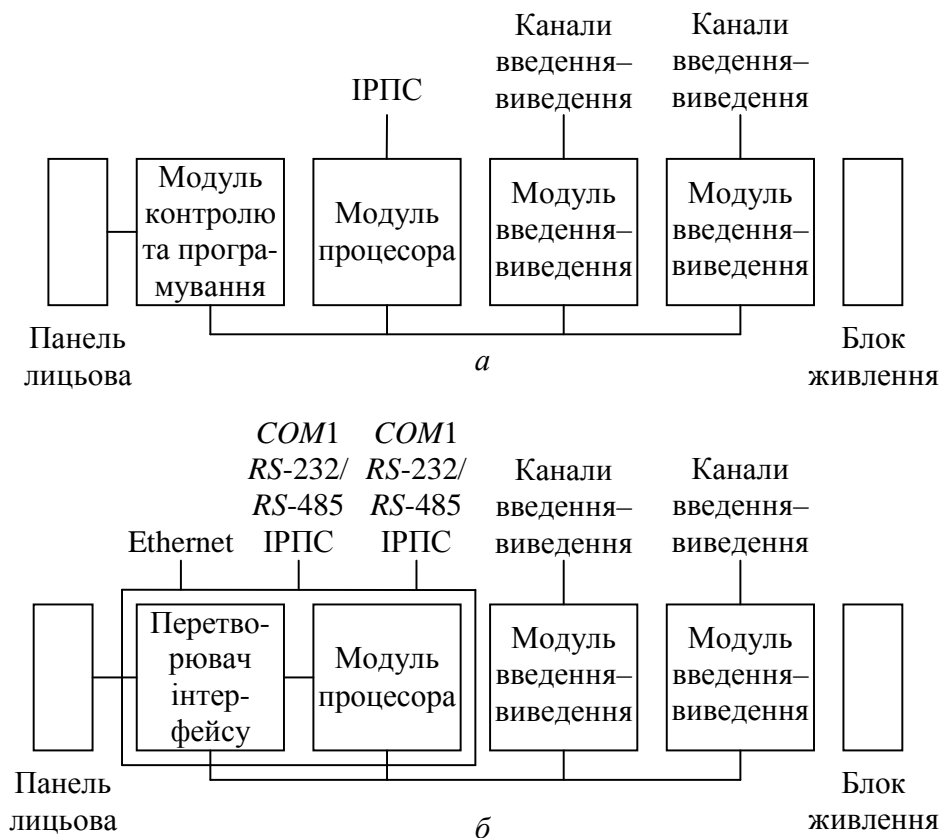


Рис. 4.22. Спрощена архітектура контролерів: а – Р-130; б – Р-130М

Як видно з рис. 4.22, основні зміни пов'язані з підключенням процесора. Перетворювач інтерфейсу здійснює формування керувальних сигналів внутрішньої магістралі контролера, а також перетворення сигналів комунікаційних портів контролера в гальванічно розв'язані сигнали інтерфейсів *RS-232*, *RS-485* або ІРПС. Пропонований підхід дозволяє реалізувати таку мережеву архітектуру.

Контролери P-130 можуть бути підключені до контролера P-130M за допомогою інтерфейсу ІРПС (рис. 4.23). При цьому P-130M працюватиме не тільки як контролер, але і як шлюз мережі «Транзит». Тим самим здійснюється можливість інтеграції наявного парку контролерів P-130 у сучасні системи керування технологічними процесами. Функціональні можливості шлюзу P-130M збільшуватимуться – зокрема, буде додано функції ведення архівів даних для контролерів P-130.

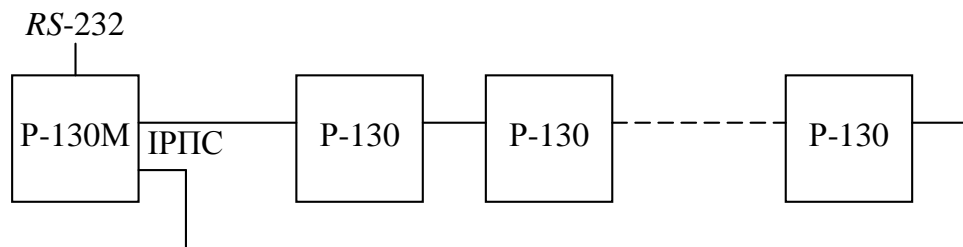


Рис. 4.23. Приклад використання контролера як шлюзу мережі «Транзит»

Для сполучення контролерів P-130M можуть бути використані інтерфейси *RS-485 Modbus* і *Ethernet* (рис. 4.24) [7]. У багатьох випадках, наприклад за поганої передбачуваності доступу до *Ethernet*, доцільно використовувати для сполучення між контролерами інтерфейс *Modbus*, а *Ethernet* використовувати для сполучення з верхнім рівнем системи керування.

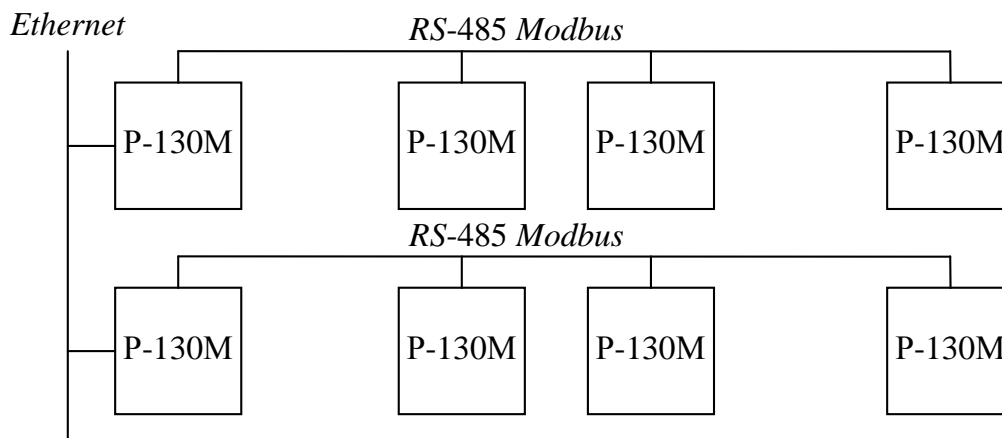


Рис. 4.24. Мережа контролерів P-130M

**Багатофункціональні мікроконтролери серії КОНТРАСТ.** Виробник мікроконтролерів Р-130 і Р-130М ВАТ «Завод електроніки і механіки» (м. Чебоксари) постачає багатофункціональні високопродуктивні середньо- та багатоканальні контролери нового покоління серії КОНТРАСТ, орієнтовані на роботу у складних системах автоматизації різної архітектури як пристрої нижнього рівня або як автономні пристрої [7]. Широке застосування сучасних електронних компонентів провідних зарубіжних виробників дало змогу забезпечити високі технічні характеристики контролера, а конструктивна уніфікація з мікроконтролерами Р-130 – порівняно низьку вартість нових контролерів КОНТРАСТ. Ці контролери призначені для побудови сучасних автоматизованих систем керування технологічними процесами (АСК ТП) і дозволяють здійснювати оперативне керування з використанням ПК, автоматичне регулювання, автоматичне логіко-програмне керування, автоматичне керування зі змінною структурою, захист і блокування, сигналізацію, індикацію та реєстрацію керованих параметрів.

**Багатофункціональні мікропроцесорні контролери серії МІК.** Виробляються підприємством «Мікрол» (м. Івано-Франківськ). Універсальні контролери представлені серією приладів МІК-51 і МІК-52. Ці контролери можуть використовуватися як у контурах безперервного регулювання, так і в системах логіко-програмного керування. Використання сучасної елементної бази під час виробництва, наявність великого спектра різноманітних модулів розширення та гнучкість середовища програмування, – все це робить контролер МІК-51/52 універсальним інструментом вирішення завдань інтелектуальної автоматизації технологічних процесів.

Програмування контролерів МІК-51 і МІК-52 виконується мовою функціональних блоків у програмному пакеті «Редактор *FBD*-програм АЛЬФА» – програмний продукт, інтерфейс якого близький до наявних офісних пакетів. Це передбачає використання ідентичних прийомів роботи, типових скорочень клавіатури для виконання однотипних операцій, звичне розміщення панелей інструментів і кнопок на них.

#### **Контрольні запитання та завдання**

1. Які структурні елементи входять до складу типового мікропроцесора?
2. У чому полягають особливості застосування мікропроцесорних вимірювальних приладів?
3. За якими ознаками класифікують цифрові вимірювальні прилади?
4. Завдяки чому та як у приладах подвійного інтегрування відбувається автоматичне усунення впливу адитивної складової похибки вимірювання?
5. Що таке «розумні» датчики? Які переваги їх застосування?



6. Які похибки вимірювання притаманні мікропроцесорним вимірювальним приладам?
7. Для чого застосовують технологічні індикатори? З чого складається архітектура ПЛК?
8. Що таке КМОП-технологія, де вона застосовується? Які переваги властиві КМОП-схемам?
9. Які фактори визначають прогрес автоматизованого керування технологічними процесами?
10. У чому полягають особливості цифрових систем автоматичного керування?
11. Що таке програмне забезпечення цифрових систем автоматичного керування технологічними процесами? У чому полягає технологія розроблення функціонального програмного забезпечення ЦСАК ТП?
12. Що таке інтерфейс? Дайте характеристику найбільш поширеним у промисловій автоматизації типам інтерфейсу.
13. Які переваги та вади мають послідовний і паралельний інтерфейси?
14. Що таке протокол обміну? Які протоколи набули найбільшого поширення у промислових мережах?
15. Наведіть порівняльну характеристику основних режимів використання керувальних ЕОМ у системах керування.
16. Які пристрої використовують для зв'язку контролерів і КЕОМ з об'єктами керування? Що входить до їх складу?
17. У чому полягають особливості будови та використання керувально-обчислювальних комплексів на базі мікро-ЕОМ?
18. Що таке ПЛК, чим вони відрізняються від «звичайних» контролерів? Які складові включає архітектура ПЛК?
19. Якими конструктивними ознаками промислові комп'ютери відрізняються від офісних? У чому їх переваги над офісними комп'ютерами і чим вони їм поступаються?
20. Для чого використовують пристрої введення та виведення аналогових і дискретних сигналів? Які перетворювачі належать до міжсистемних?

## 5. РОЗРОБЛЕННЯ СХЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ. СХЕМИ КОНТРОЛЮ ТА КЕРУВАННЯ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

### 5.1. ПРИЗНАЧЕННЯ СХЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ЇХ ВИКОНАННЯ

Схема автоматизації (поширеною в практичному використанні залишається «стара» назва: функціональна схема автоматизації, особливо у її скороченому варіанті – ФСА) – основний технічний документ, який визначає функціонально-блочну структуру окремих вузлів автоматичного контролю, керування і регулювання технологічного процесу та оснащення об'єкта керування приладами і засобами автоматизації, зокрема засобами телемеханіки та обчислювальної техніки.

На схемах автоматизації зображують:

- 1) технологічне та інженерне обладнання і комунікації (трубопроводи, газоходи, повітропроводи) об'єкта, що автоматизується;
- 2) технічні засоби автоматизації, що утворюють контури контролю, регулювання та керування<sup>17</sup>;
- 3) лінії зв'язку між окремими технічними засобами автоматизації або контурами.

Об'єктом керування в системах автоматизації технологічних процесів є сукупність основного та допоміжного устаткування разом із вмонтованими в нього запірними та регулювальними органами, а також енергії, сировини й інших матеріалів, що визначаються особливостями технології. Створення ефективних систем автоматизації передбачає потребу в поглибленому вивченні технологічного процесу не лише проектувальниками, а й спеціалістами монтажних, налагоджувальних та експлуатаційних організацій.

У процесі розроблення схем автоматизації технологічних процесів потрібно забезпечити<sup>18</sup>:

- отримання первинної інформації про стан технологічного процесу та устаткування;
- безпосередній вплив на технологічний процес для керування ним;
- стабілізацію технологічних параметрів процесу;
- контроль та реєстрацію технологічних параметрів процесу та стану технологічного устаткування.

Зазначені завдання вирішують на підставі аналізу умов роботи технологічного устаткування, виявлених законів та критеріїв керування об'єктом, а також вимог до точності стабілізації, контролю і реєстрації технологічних параметрів, до якості регулювання і надійності.

<sup>17</sup> *Контур контролю, регулювання та керування* – це сукупність окремих функціонально поєднаних приладів, які виконують певне завдання з контролю, регулювання, сигналізації, керування тощо.

<sup>18</sup> Загальні правила виконання схем автоматизації регламентує ДСТУ Б А.2.4-3:2009 «СПДБ. Правила виконання робочої документації автоматизації технологічних процесів», чинний від 23.01.2009.

Функціональні завдання автоматизації зазвичай реалізують за допомогою різних технічних засобів, зокрема: відбірних пристроїв, засобів отримання первинної інформації, засобів перетворення та обробки інформації, засобів подання інформації обслуговуючому персоналу, комбінованих, комплектних та допоміжних пристроїв.

До результатів складання схем автоматизації належить:

- 1) обрання методів вимірювання технологічних параметрів;
- 2) обрання основних технічних засобів автоматизації, які найбільш повно відповідають вимогам та умовам роботи об'єкта, що автоматизується;
- 3) визначення приводів виконавчих механізмів регулювальних та запірних органів технологічного устаткування, керованого автоматично або дистанційно;
- 4) розміщення засобів автоматизації на щитах, пультах, технологічному устаткуванні, трубопроводах тощо та визначення способів подання інформації про стан технологічного процесу й устаткування, виготовлення іншої проектною документації (схем зовнішніх з'єднань, схем щитів і пультів, монтажно-комутаційних схем тощо).

Сучасний розвиток усіх галузей промисловості характеризується великим розмаїттям технологічних процесів. Практично не обмежені й умови їх застосування та вимоги до керування й автоматизації. Однак, спираючись на досвід проектування систем керування та автоматизації, можна сформулювати деякі *загальні принципи*, якими слід керуватися, розробляючи схеми автоматизації:

- 1) рівень автоматизації технологічного процесу в кожен проміжок часу має визначатися не лише доцільністю впровадження певного комплексу технічних засобів та досягнутим рівнем науково-технічних розробок, а й перспективою модернізації та розвитку цих технологічних процесів;
- 2) під час розроблення схем автоматизації, а також вибираючи технічні засоби, слід урахувати: вид та характер технологічного процесу, умови пожежо- та вибухобезпеки, агресивність і токсичність навколишнього та робочого середовищ тощо; параметри та фізико-хімічні властивості вимірюваного середовища; відстань від місця встановлення датчиків, допоміжних пристроїв, виконавчих механізмів, приводів машин та запірних органів до пунктів керування та контролю; потрібну точність та швидкодію засобів автоматизації;
- 3) систему автоматизації технологічних процесів потрібно будувати на базі засобів автоматизації та обчислювальної техніки, що виробляються серійно. Намагатись застосовувати однотипні засоби автоматизації і віддавати перевагу уніфікованим системам, які характеризуються простотою поєднання, взаємозамінністю та зручністю компонування на щитах керування. Використання однотипної апаратури дає значні переваги під час монтажу, налагодження, експлуатації, забезпечення запасними частинами тощо;

4) добираючи локальні засоби збирання та нагромадження первинної інформації (автоматичні датчики), вторинні прилади, регулювальні та виконавчі пристрої, використовувати переважно прилади та засоби автоматизації Державної системи промислових приладів і засобів автоматизації;

5) вибираючи засоби автоматизації, що використовують допоміжну енергію (електричну, пневматичну, гідравлічну), керуватися умовами пожежо- та вибухобезпеки об'єкта, що автоматизується, агресивністю навколишнього середовища, вимогами до швидкодії, дальності передачі сигналів інформації та команд керування тощо;

б) обмежувати кількість приладів, апаратури керування і сигналізації, які монтуються на оперативних щитах і пультах. Надлишок апаратури ускладнює експлуатацію, відвертає увагу обслуговуючого персоналу від спостереження за основними параметрами, що визначають хід технологічного процесу, збільшує вартість установки, терміни монтажних та налагоджувальних робіт. Прилади і засоби автоматизації допоміжного призначення доцільніше розміщувати на окремих щитах поблизу технологічного устаткування.

Наведені принципи загальні, але не вичерпні для всіх випадків, які можуть траплятися в практиці проектування систем автоматизації технологічних процесів. Однак для кожного конкретного випадку їх потрібно враховувати в реалізації технічного завдання на автоматизацію проектованого об'єкта.

## **5.2. ГРАФІЧНЕ ЗОБРАЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО УСТАТКУВАННЯ ТА КОМУНІКАЦІЙ**

Технологічне та інженерне обладнання на схемах автоматизації зображають відповідно до ГОСТ 2.780, ГОСТ 2.782, ГОСТ 2.788, ГОСТ 2.789, ГОСТ 2.790 – ГОСТ 2.795, комунікації залежно від транспортованих у них середовищ – до додатка 3 ГОСТ 14202–69.

Під час розроблення схем автоматизації технологічне устаткування та комунікації зображають зазвичай без наведення окремих технологічних апаратів і трубопроводів допоміжного призначення. Однак зображена таким чином технологічна схема має давати чітке уявлення про принцип її роботи та взаємодію із засобами автоматизації.

Технологічні апарати і трубопроводи допоміжного призначення показують лише у випадках, коли вони механічно з'єднані чи взаємодіють із засобами автоматизації. В окремих випадках деякі елементи технологічного устаткування допускається зображувати на схемах автоматизації у вигляді прямокутників із зазначенням назв цих елементів або не показувати зовсім.

На технологічних трубопроводах зазвичай показують ту регулювальну та запірну арматуру, яка безпосередньо бере участь у контролі та керуванні процесом, а в місцях, де передбачається встановлення відбірних пристроїв і регулювальних органів, зазначають діаметри умовних проходів.

Технологічні комунікації і трубопроводи рідин та газів зображують умовними позначеннями (нумерують) відповідно до ГОСТ 2.784–96, наведеними в табл. 5.1. Для більш детального розкриття характеру середовища до цифрового позначення може додаватися літерний індекс, наприклад, вода чиста – 1ч, пара перегріта – 2п, пара насичена – 2н тощо. Умовні числові позначення трубопроводів слід проставляти в розривах ліній, що зображають трубопроводи, на відстані, не меншій ніж 50 мм один від одного.

**Таблиця 5.1. Умовні цифрові позначення трубопроводів для рідин та газів**

Назва середовища, транспортованого трубопроводом	Позначення трубопроводу
1	2
Вода	1
Пара	2
Повітря	3
Азот	4
Кисень	5
<b>Інертні гази:</b>	
Аргон	6
Неон	7
Гелій	8
Криптон	9
Ксенон	10
Аміак	11
Кислота (окиснювач)	12
Луг	13
Масило	14
Рідке паливо	15
<b>Горючі та вибухонебезпечні гази:</b>	
Водень	16
Ацетилен	17
Фреон	18
Етан	19
Метан	20
Етилен	21
Пропан	22
Пропілен	23
Бутан	24
Бутилен	25
Протипожежний трубопровід	26
Вакуум	27


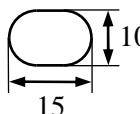
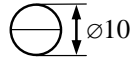
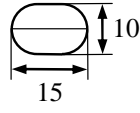
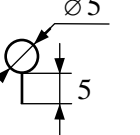

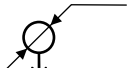

Деталі трубопроводів, арматуру, теплотехнічні та санітарно-технічні пристрої й апаратуру показують умовними позначеннями згідно з чинними

стандартами. Для рідин і газів, не наведених у табл. 5.1, дозволено використовувати для позначення інші цифри (починаючи з 28), але обов'язково з необхідними поясненнями введених умовних позначень.

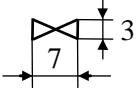
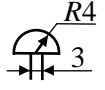
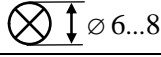
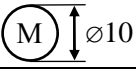
### 5.3. ГРАФІЧНЕ ЗОБРАЖЕННЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

Прилади, засоби автоматизації, електричні пристрої та елементи обчислювальної техніки на схемах автоматизації зображують відповідно до Міждержавного стандарту ДСТУ Б А.2.4-3:2009 та галузевих нормативних документів. Якщо у стандартах немає потрібних зображень, дозволено застосовувати нестандартні зображення, які слід виконувати на основі характерних ознак зображуваних пристроїв. Наведені стандарти визначають систему побудови графічних (табл. 5.2) та літерних (табл. 5.3–5.5) умовних позначень за функціональними ознаками приладів. Складні прилади, які виконують декілька функцій, можна зображувати декількома дотичними колами.

**Таблиця 5.2. Розміри графічних умовних позначень приладів, засобів автоматизації та електроапаратури**

Назва	Позначення
1	2
Первинний вимірювальний перетворювач (датчик): засіб вимірювання, що встановлюється поза щитом (місцевого розміщення) на технологічному трубопроводі, апараті, стіні, підлозі, колоні, металоконструкції: а) базове позначення; б) допустиме позначення	а)  б) 
Прилад, установлений на щиті, пульті: а) базове позначення; б) допустиме позначення	а)  б) 
Виконавчий механізм. Загальне позначення. Положення регулювального органа у разі припинення подачі енергії чи керувального сигналу не показується	
Виконавчий механізм, який у разі припинення подачі енергії чи керувального сигналу: а) відкриває регулювальний орган; б) закриває регулювальний орган; в) не змінює стану регулювального органа	а)  б)  в) 

Закінчення табл. 5.2

1	2
Регулювальний орган	
Дзвінок електричний	
Лампа розжарювання (освітлювальна та сигнальна)	
Машина електрична (М – двигун, Г – генератор)	

Таблиця 5.3. Літерні умовні позначення

Вимірювана величина			Функції, виконувані приладом		
Позначення	Основне значення першої літери	Додаткове значення, що уточнює значення першої літери	Відображення інформації	Формування вихідного сигналу	Додаткове значення
1	2	3	4	5	6
<i>A</i>	+	-	Сигналізація	-	-
<i>B</i>	+				
<i>C</i>	+	-	-	Регулювання, керування	-
<i>D</i>	Густина	Різниця, перепад	-	-	-
<i>E</i>	Будь-яка електрична величина	-	+	-	-
<i>F</i>	Витрата	Співвідношення, частка, дріб	-	-	-
<i>G</i>	Розмір, положення, переміщення	-	+	-	-
<i>H</i>	Ручний вплив	-	-	-	Верхня границя вимірюваної величини
<i>I</i>	+	-	Показання	-	-
<i>J</i>	+	Автоматичне перемикання, оббігання	-	-	-
<i>K</i>	Час, часова програма	-	-	+	-
<i>L</i>	Рівень	-	-	-	Нижня границя вимірюваної величини

Закінчення табл. 5.3

1	2	3	4	5	6
<i>M</i>	Вологість	-	-	-	-
<i>N</i>	+	-	-	-	-
<i>O</i>	+	-	-	-	-
<i>P</i>	Тиск, вакуум	-	-	-	-
<i>Q</i>	Величина, що характеризує якість, склад, концентрацію	Інтегрування, підсумовування в часі	-	+	-
<i>R</i>	Радіоактивність	-	Реєстрація	-	-
<i>S</i>	Швидкість, частота	-	-	Вмикання, вимикання, перемикання	-
<i>T</i>	Температура	-	-	+	-
<i>U</i>	Декілька різнорідних вимірюваних величин	-	-	-	-
<i>V</i>	В'язкість	-	+	-	-
<i>W</i>	Маса	-	-	-	-
<i>X</i>	Нерекомендована резервна літера	-	-	-	-
<i>Y</i>	+	-	-	+	-
<i>Z</i>	+	-	-	+	-

Примітка. Літерні позначення, помічені знаком «+», використовують як резервні, а помічені знаком «-» – не використовують.

**Таблиця 5.4. Додаткові літерні позначення, що відображають функціональні ознаки приладів**

Назва	Позначення
Чутливий елемент (первинне перетворення)	<i>E</i>
Дистанційне передавання (проміжне перетворення)	<i>T</i>
Станція керування	<i>K</i>
Перетворення; обчислювальні функції	<i>Y</i>

**Таблиця 5.5. Додаткові літерні позначення, що відображають функціональні ознаки перетворювачів сигналів та обчислювальних пристроїв**

Назва	Позначення
1	2
<i>Рід сигналу:</i> Електричний	<i>E</i>
Пневматичний	<i>P</i>



Закінчення табл. 5.5

1	2
Рід сигналу: Електричний	$E$
Пневматичний	$P$
Гідравлічний	$G$
Види сигналу: Аналоговий	$A$
Дискретний	$D$
Операції, що виконуються обчислювальним пристроєм: Додавання	$\Sigma$
Множення сигналу на постійний коефіцієнт $K$	$K$
Множення двох чи більше сигналів	$\times$
Ділення сигналів	$:$
Піднесення сигналу до $n$ -го степеня	$f^n$
Добування з сигналу кореня $n$ -го степеня	$\sqrt[n]{f}$
Логарифмування	$\lg$
Диференціювання	$dx / dt$
Інтегрування	$\int$
Зміна знака сигналу	$\times(-1)$
Обмеження верхнього значення сигналу	$\max$
Обмеження нижнього значення сигналу	$\min$
Уведення сигналу в ЕОМ	$B_i$
Виведення інформації з ЕОМ	$B_0$

#### 5.4. МЕТОДИКА ПОБУДОВИ УМОВНИХ ГРАФІЧНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Методика побудови графічних умовних позначень для спрощеного і розгорнутого способів спільна (рис. 5.1). У верхню частину кола вписують літерні позначення вимірюваної величини та функціональної ознаки приладу. В нижню частину кола вписують позиційне позначення (цифрове чи літерно-цифрове), що служить для нумерації контура контролю чи регулювання (за спрощеного способу побудови схеми автоматизації) або окремих елементів контура (за розгорнутого способу).

Послідовність розміщення літерних позначень у верхній частині (зліва направо) має бути таким: позначення основної вимірюваної величини; позначення, що уточнює (у разі потреби) основну вимірювану величину; позначення функціональних ознак приладу. Функціональні ознаки (якщо їх декілька в одному засобі автоматизації) розміщують у послідовності, показаній на рис. 5.1.

Створюючи умовні позначення приладів, слід вказувати не всі функціональні ознаки приладу, а лише використовувані в схемі. Так, позначаючи показувальні та самописні прилади (якщо функція «показання», тобто індикації, поточного значення вимірюваної величини не використовується), слід писати  $TR$  замість  $TIR$ ,  $PR$  замість  $PIR$  тощо.

В обґрунтованих випадках (наприклад, у позиційних позначеннях, що складаються з великої кількості знаків) для позначення первинних перетворювачів і приладів замість кола можна застосовувати позначення у вигляді еліпса (див. п. 1, б та 2, б табл. 5.2).

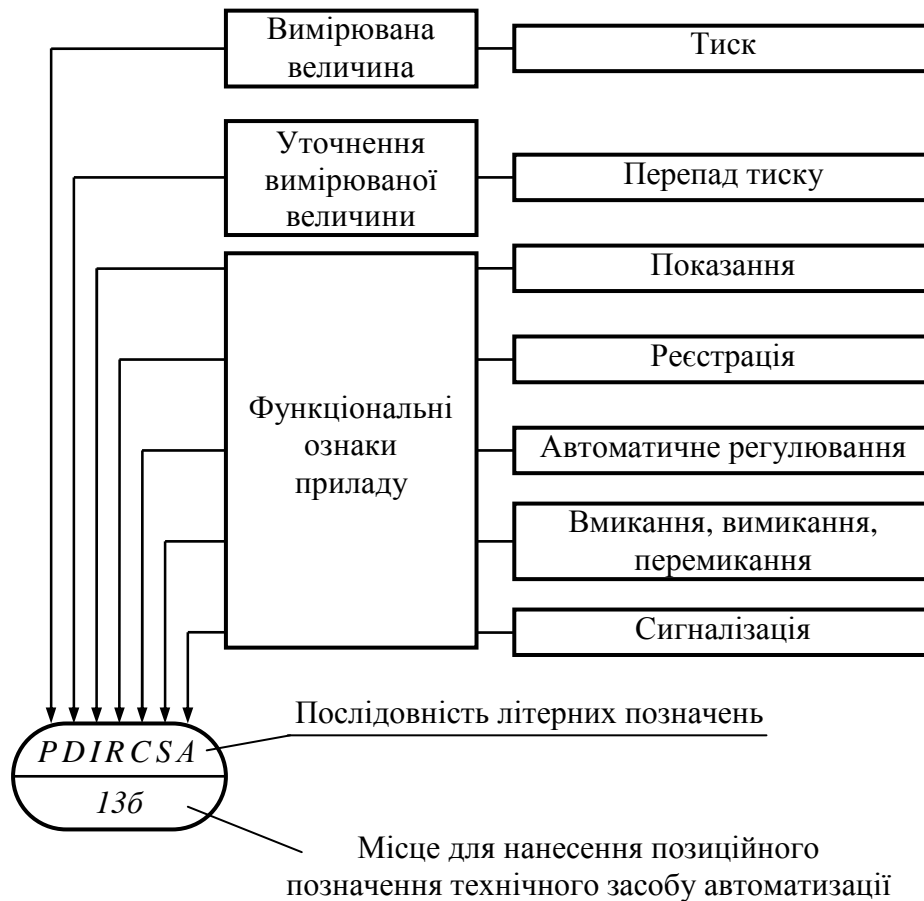


Рис. 5.1. Приклад побудови умовного позначення технічного засобу автоматизації

Приклади побудови умовних позначень приладів і засобів автоматизації відповідно до ДСТУ Б А.2.4-3:2009 наведено в табл. 5.6. Використовуючи літерні умовні позначення ДСТУ Б А.2.4-3:2009, слід керуватись такими правилами.

1. Літеру *A* (див. табл. 5.3) застосовувати для позначення функції «сигналізація» незалежно від того, чи винесено сигнальну апаратуру на якийсь щит, а чи її вмонтовано у сам прилад. У разі потреби додають символи ламп, гудка, дзвінка тощо.

2. Літеру *S* застосовувати для позначення контактної пристрою (тільки для вмикання, вимикання, перемикання, блокування). Літерою *S* не позначають функції регулювання (зокрема позиційного). У разі застосування контактної пристрою для вмикання, вимикання і одночасно для сигналізації в позначенні приладу мають бути обидві літери – *S* і *A*.

Граничнодопустимі значення вимірюваних величин, якими керуються для вмикання, вимикання, блокування чи сигналізації, слід конкретизувати додаванням літер  $H$  і  $L$ . Останні наносити поза графічним позначенням, праворуч від нього (див. табл. 5.6, п. 26, 28).

3. Для конкретизації вимірюваної величини, що може мати кілька значень, біля зображення приладу (праворуч від нього) слід зазначати назву чи символ вимірюваної величини, наприклад, «напруга» або  $U$ , «струм» або  $I$ , рН,  $O_2$  тощо (див. табл. 5.6, п. 33–35, 38–40).

4. У разі потреби біля зображення приладу допускається зазначати вид радіоактивності, наприклад  $\alpha$ -,  $\beta$ - чи  $\gamma$ -випромінювання (див. табл. 5.6, п. 41).

5. Літеру  $U$  можна використовувати для позначення приладу, що вимірює декілька різнорідних величин. Детальне розшифрування вимірюваних величин має бути наведено біля приладу чи на полі креслення (див. табл. 5.6, п. 43).

6. Для позначення величин, не передбачених стандартом, можна використати резервні літери. Часто застосовувані величини слід позначати однією й тією самою резервною літерою. Для одноразового (виняткового) застосування можна використати літеру  $X$ . Застосовані резервні літерні позначення мають бути розшифровані на схемі. Не допускається в одній і тій самій документації однією резервною літерою позначати різні величини.

7. Для позначення додаткових значень великі літери  $D, F, Q, T$  допускається заміняти на малі  $d, f, q, t$ .

8. В окремих випадках, коли позиційне позначення приладу не вміщується в коло його графічного зображення, допускається наносити його поза колом (див. табл. 5.6, п. 52).

9. Літера  $E$  як додаткове позначення (див. табл. 5.6) застосовується для позначення чутливих елементів, тобто пристроїв, які виконують первинне перетворення, наприклад, первинних термоелектричних перетворювачів (термопар), термоперетворювачів опору (термометрів опору), датчиків пірометрів, звужувальних пристроїв витратомірів, датчиків акустичних рівнемірів тощо.

10. Літера  $T$  означає проміжне перетворення – дистанційне передавання сигналу. Її рекомендується застосовувати для позначення приладів з дистанційним передаванням показань, наприклад, безшкальних манометрів (дифманометрів), ротаметрів з дистанційним передаванням сигналів тощо.

11. Літеру  $K$  застосовують для позначення приладів, які мають станцію керування, тобто перемикач вибору виду керування «автоматичне» ↔ «ручне».

12. Літеру *Y* рекомендується застосовувати для позначень перетворювачів сигналів та обчислювальних пристроїв, при цьому для конкретизації функціональної ознаки перетворювачів сигналів та обчислювальних пристроїв біля зображення технічного засобу відповідним символом (див. табл. 5.6, п. 46, 47) слід вказати вид перетворення (*P/E*, *E/E*, *A/D* тощо) чи обчислювальної операції (див. табл. 5.5).

13. Такої конкретизації потребує й літера *Q*: вгорі, праворуч від зображення технічного засобу потрібно вказати, який саме якісний параметр він вимірює, наприклад, рН, якщо це вимірювач рН,  $O_2$  – якщо це аналізатор концентрації кисню тощо.

14. Послідовність побудови умовних позначень із застосуванням додаткових літер така: спочатку ставиться літера, якою позначають вимірювану величину, на другому – одна з додаткових літер: *E*, *T*, *K* чи *Y*; наприклад, первинні вимірювальні перетворювачі температури (термоелектричні перетворювачі, термоперетворювачі опору та ін.) позначаються через *TE*, первинні вимірювальні перетворювачі витрат (звужувальні пристрої, датчики індукційних витратомірів, ротаметрів тощо) – *FE*; безшкальні витратоміри з дистанційним передаванням – *FT* і т. д.

15. У разі застосування позначень з табл. 5.5 написи, що розшифровують вид перетворення чи операції, які виконуються обчислювальним пристроєм, вказувати праворуч від графічного зображення приладу.

16. В обґрунтованих випадках для уникнення неправильного розуміння схеми допускається замість умовних позначень наводити повну назву перетворюваних сигналів. Таким чином, рекомендується позначати деякі специфічні сигнали, або ті, що рідко використовуються, наприклад, кодовий, часоімпульсний, числоімпульсний тощо.

17. У разі побудови позначень комплектів засобів автоматизації перша літера в позначенні кожного приладу, що входить в комплект, є назвою вимірюваної комплектом величини. Наприклад, у комплекті для вимірювання та регулювання температури первинний вимірювальний перетворювач потрібно позначати через *TE*, вторинний реєструвальний прилад – *TR*, регулювальний блок – *TC* і т. д.

У побудові умовних позначень згідно з ДСТУ Б А.2.4-3:2009 передбачено такі винятки:










– у всіх пристроях, що виконані як окремі блоки і призначені для ручних операцій, на першому місці в позначенні ставлять літеру *H* незалежно від того, до складу якого вимірювального комплекту вони входять, наприклад, перемикачі електричних кіл вимірювання (керування), перемикачі газових (повітряних) ліній позначають через *HS*, панелі дистанційного керування – *HC*, кнопки (ключі) для дистанційного керування, ручні задатчики – *H*, кнопки (ключі) для дистанційного керування з підсвіткою – *HA* тощо;

– для комплекту, призначеного для вимірювання декількох різнорідних величин, первинні вимірювальні перетворювачі (датчики) позначають від-








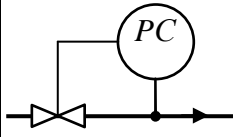







повідно до вимірюваної величини, а вторинний прилад – *UR* (з відповідним доповненням, як це показано в п. 43 табл. 5.6);

– в окремих випадках для позначень комплектів, призначених для вимірювання якості непрямим методом, перша літера в позначенні датчика може відрізнитися від першої літери в позначенні вторинного приладу. Наприклад, якщо для вимірювання якості продукту використовують метод температурної депресії (датчиками температури при цьому є термометри опору, вторинним приладом – автоматичний міст), то позначення цього комплекту буде таким: датчики – *TE*, вторинний прилад – *QR* (див. поз. 10-1, 10-2, 10-3 на рис. 5.2).














**Таблиця 5.6. Приклади побудови умовних позначень приладів і засобів автоматизації**

Порядковий номер	Назва	Позначення
1	2	3
1	Первинний вимірювальний перетворювач (чутливий елемент) для вимірювання температури місцевий (перетворювач термоелектричний або термоперетворювач опору, термобалон манометричного термометра, датчик пірометра тощо)	
2	Прилад для вимірювання температури показувальний місцевий (наприклад, термометр розширення)	
3	Прилад для вимірювання температури показувальний, встановлений на щиті (мілівольтметр, логометр, потенціометр, міст автоматичний тощо)	
4	Прилад місцевий для вимірювання температури безшкальний, з дистанційним передаванням показань (термометр манометричний безшкальний з пневмо- чи електропередачею сигналу)	
5	Прилад для вимірювання температури одноточковий реєструвальний (самописний), встановлений на щиті (логометр, потенціометр, міст автоматичний і т. ін.)	
6	Прилад для вимірювання температури з автоматичним об'їгальним пристроєм реєструвальний, встановлений на щиті (потенціометр триточковий самописний, міст автоматичний самописний триточковий тощо)	
7	Регулятор температури безшкальний місцевий (наприклад, дилатометричний регулятор температури)	
8	Комплект для вимірювання температури самописний регулювальний, оснащений станцією керування, встановлений на щиті (наприклад, пневматичний вторинний прилад і регулювальний блок системи СТАРТ)	
9	Прилад для вимірювання температури, безшкальний, з контактним пристроєм, місцевий (наприклад, термореле)	
10	Панель дистанційного ручного керування (електрична чи пневматична), встановлена на щиті	













Продовження табл. 5.6

1	2	3
11	Перемикач електричних каналів вимірювання (керування) або перемикач для газових чи повітряних ліній, установлений на щиті	
12	Прилад для вимірювання тиску (розрідження) показувальний місцевий (будь-який показувальний манометр, дифманометр, тягомір, напоромір, вакуумметр тощо)	
13	Прилад для вимірювання перепаду тиску показувальний місцевий (наприклад, дифманометр показувальний)	
14	Прилад для вимірювання тиску (розрідження) безшкальний з дистанційним передаванням показань місцевий (наприклад, манометр або дифманометр безшкальні з пневмо- чи електропередачею сигналу)	
15	Прилад для вимірювання тиску (розрідження) безшкальний реєструвальний, установлений на щиті (наприклад, самописний манометр чи будь-який самописний прилад для реєстрації тиску)	
16	Прилад місцевий для вимірювання тиску з контактним пристроєм (наприклад, реле тиску)	
17	Прилад місцевий для вимірювання тиску (розрідження) показувальний з контактним пристроєм (наприклад, електроконтактні манометр, вакуумметр та ін.)	
18	Регулятор тиску, що працює без використання стороннього джерела енергії (регулятор тиску прямої дії, місцевий)	
19	Первинний вимірювальний перетворювач (чутливий елемент) для вимірювання витрати місцевий (діафрагма, сопло, труба Вентурі, датчик індукційного витратоміра тощо)	
20	Прилад для вимірювання витрати безшкальний з дистанційним передаванням показань місцевий (наприклад, безшкальний дифманометр-витратомір або ротаметр з пневмо- чи електропередачею сигналів)	
21	Регулятор співвідношення витрат, установлений на щиті (наприклад, блок регулювання співвідношення витрат системи СТАРТ)	
22	Прилад для вимірювання витрати показувальний місцевий (наприклад, дифманометр чи ротаметр показувальні)	
23	Прилад для вимірювання витрати показувальний інтегровальний місцевий (наприклад, будь-який лічильник-витратомір з інтегратором або показувальний дифманометр-витратомір із вмонтованим інтегратором)	
24	Первинний вимірювальний перетворювач (чутливий елемент) для вимірювання рівня місцевий (наприклад, первинний вимірювальний перетворювач електричного чи акустичного рівнемірив)	
25	Прилад для вимірювання рівня показувальний місцевий (наприклад, дифманометр для вимірювання рівня)	



Продовження табл. 5.6

1	2	3
26	Прилад для вимірювання рівня з контактним пристроєм місцевий (наприклад, датчик-реле рівня, використовуваний для сигналізації; літера <i>H</i> означає, що здійснюється сигналізація тільки верхнього граничного значення рівня)	
27	Прилад для вимірювання рівня безшкальний з дистанційним передаванням показань місцевий (наприклад, дифманометр-рівнемір безшкальний з пневмо- чи електропередачею сигналу; датчик буйкового рівнеміра тощо)	
28	Прилад для вимірювання рівня показувальний із сигнальним пристроєм, установлений на щиті (літери <i>H</i> і <i>L</i> означають сигналізацію верхнього та нижнього граничних рівнів)	
29	Прилад для вимірювання густини розчину безшкальний із дистанційним передаванням показань місцевий (наприклад, датчик густиноміра з пневмо- чи електропередачею)	
30	Прилад для вимірювання розмірів показувальний місцевий (наприклад, показувальний прилад для вимірювання товщини сталюї стрічки)	
31	Пристрій для перетворення положення вихідного штока регулювального органа з дистанційним передаванням показань місцевий (наприклад, дистанційний покажчик положення типу ДУП або датчик положення – реостатний чи індуктивний – змонтований на електричному приводі)	
32	Прилад для вимірювання будь-якої електричної величини показувальний місцевий (написи, що розшифровують конкретно вимірювану величину, розміщуються або поруч з приладом, або у вигляді таблиці на полі креслення) (наприклад, п. 33–35)	
33	Вольтметр місцевий	
34	Амперметр місцевий	
35	Ватметр, установлений на щиті	
36	Прилад для керування процесом за часовою програмою, встановлений на щиті (наприклад, командний електропневматичний прилад, багатоланцюгове реле часу тощо)	
37	Прилад для вимірювання вологості реєструвальний, установлений на щиті (наприклад, вторинний прилад вологоміра самописного)	
38	Первинний вимірювальний перетворювач (чутливий елемент) для вимірювання якості продукту місцевий (наприклад, датчик рН-метра)	

Продовження табл. 5.6

1	2	3
39	Прилад для вимірювання якості продукту показувальний місцевий (наприклад, газоаналізатор показувальний для контролю вмісту кисню в димових газах)	 O <sub>2</sub>
40	Прилад для вимірювання якості продукту реєструвальний регульовальний, установлений на щиті (наприклад, вторинний самописний прилад регулятора концентрації азотної кислоти в розчині)	 HNO <sub>3</sub>
41	Прилад для вимірювання радіоактивності показувальний із сигнальним пристроєм місцевий (наприклад, прилад показувальний із сигналізацією граничнодопустимої інтенсивності $\alpha$ - і $\beta$ -випроміювання)	 $\alpha, \beta$
42	Прилад для вимірювання частоти обертання привода показувальний, установлений на щиті (наприклад, вторинний прилад тахогенератора)	
43	Прилад для вимірювання в'язкості показувальний місцевий (наприклад, віскозиметр показувальний)	
44	Прилад для вимірювання декількох різнорідних величин реєструвальний місцевий (наприклад, самописний дифманометр-витратомір з додатковим записом тиску і температури пари; напис, що розшифровує вимірювані величини, наноситься або справа від приладу, або на вільному полі схеми в примітці)	 $U = f(F, P, T)$
45	Прилад для контролю погашення факела в печі безшкальний, з контактним пристроєм, установлений на щиті (наприклад, вторинний пристрій запально-запобіжного пристрою; застосування резервної літери <i>B</i> має бути зазначено на полі схеми)	
46	Перетворювач сигналу, встановлений на щиті; вхідний сигнал – електричний, вихідний сигнал також електричний (наприклад, нормувальний перетворювач термоелектрорушійної сили)	 E/E
47	Перетворювач сигналу перехідний, місцевий; вхідний сигнал пневматичний, вихідний – електричний (наприклад, пневмоелектричний перетворювач)	 P/E
48	Пускова апаратура для керування електроприводом (наприклад, магнітний пускач, контактор, тиристорний підсилювач тощо) та іншим електроустаткуванням (наприклад, електронагрівником типу ТЕН; застосування резервної літери <i>N</i> має бути зазначено на полі схеми)	
49	Апаратура, призначена для ручного дистанційного керування, встановлена на щиті (кнопка керування, ключ керування, ручний задавач тощо)	
50	Апаратура, призначена для ручного дистанційного керування, оснащена пристроєм для сигналізації, встановлена на щиті (кнопка з вбудованою лампочкою, ключ керування з підсвіткою тощо)	



1	2	3
51	Апаратура, призначена для ручного дистанційного керування, встановлена на щиті (пневматична чи електрична панель керування)	
52	Ключ керування, призначений для вибору режиму керування, встановлений на щиті (приклад наведено для ілюстрації випадку, коли позиційне позначення завелике і тому його наносять поза колом)	

Щити, штативи, пульти керування на схемах автоматизації зображують умовно у вигляді прямокутників довільних розмірів, достатніх для нанесення графічних умовних позначень приладів, що на них встановлюються, засобів автоматизації, апаратури керування та сигналізації. У прямокутниках можна вказувати номери креслень загальних видів щитів і пультів, а з лівого боку – його назву. Прилади і засоби автоматизації, розміщені поза щитами і не пов'язані безпосередньо з технологічним обладнанням та трубопроводами, умовно показують у прямокутнику «Прилади місцеві»<sup>19</sup>.

Комплектні пристрої (машини централізованого контролю, керувальні машини, комплекти телемеханіки тощо) також позначають на схемах автоматизації прямокутниками.

Функціональні зв'язки між технологічним устаткуванням і встановленими на ньому первинними перетворювачами, а також із засобами автоматизації, встановленими на щитах та пультах, на схемах показують тонкими суцільними лініями. Кожен зв'язок позначають однією лінією незалежно від фактичної кількості проводів чи труб, якими здійснюється цей зв'язок. До умовних позначень приладів і засобів автоматизації лінії зв'язку допускається підводити з будь-якого боку, зокрема і під кутом. Лінії зв'язку мають бути найкоротшими, з мінімальною кількістю перетинів. Допускається перетинання лініями зв'язку зображень технологічного устаткування і комунікацій, однак перетинання умовних позначень приладів і засобів автоматизації неприпустиме.

## 5.5. ПОЗИЦІЙНІ ПОЗНАЧЕННЯ НА СХЕМАХ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Біля кожного умовного позначення технологічного устаткування – апарата чи машини – подають назву або номер позиції (назву можна вписати всередині позначення. Можна використовувати літерно-цифрові позначення (наприклад, Т-1, Р-3, Н-12 тощо), де буква означає назву групи однотипного устаткування (відповідно теплообмінників, резервуарів, насосів), а цифра – порядковий номер апарата чи машини серед йому подібних.

<sup>19</sup> Згідно з ДСТУ 2681–94 «Метрологія. Терміни та визначення» різного роду перетворювачі: узгоджувальні, нормувальні, передавальні тощо (а саме їх переважно розміщують у цьому прямокутнику) належать не до приладів, а до вимірювальних пристроїв. Там також показують різні види електроустаткування: кнопки та пости керування, магнітні пускачі, контактори тощо. Щоб охопити все це, згаданий напис варто б замінити на такий (див. рис. 5.2–5.4): «Технічні засоби автоматизації місцеві» (прим. авт.).

Приладам і засобам автоматизації, зображеним на схемах автоматизації, надають позиційні позначення (позиції), що зберігаються незмінними в усіх матеріалах проекту. На стадіях проекту позиційні позначення виконують арабськими цифрами відповідно до нумерації і заявочної відомості на прилади, засоби автоматизації та електроапаратуру.

На стадії робочої документації за одностадійного проектування позиційні позначення приборів та засобів автоматизації утворюються з двох частин: позначення арабськими цифрами номера функціональної групи (контур контролю або регулювання) і малими літерами кириличного алфавіту одиниць приладів і засобів автоматизації в певній функціональній групі (контурі); при цьому висота цифр і великих літер має бути 3,5 мм, висота малих літер – 2,5 мм.

Літерні позначення надаються кожному елементу функціональної групи (контур) за алфавітом відповідно до послідовності надходження сигналу – від пристроїв отримання інформації до пристроїв впливу на керований процес (наприклад, первинний перетворювач – проміжний перетворювач – регулятор – виконавчий механізм – регулювальний орган). Допускається заміна літер цифрами (через дефіс), які, починаючи з одиниці, зростають у тій самій послідовності<sup>20</sup>.

Позиційні позначення окремих приладів і засобів автоматизації місцевого розміщення, таких як регулятор прямої дії, манометр, термометр розширення тощо, складаються лише з порядкового номера.

Позиційні позначення потрібно надавати всім елементам функціональних груп, за винятком:

- відбірних пристроїв;
- приладів і засобів автоматизації, що постачаються комплектно з технологічним устаткуванням;
- регулювальних органів та виконавчих механізмів, які входять у систему автоматичного керування, але замовляються і встановлюються у технологічних частинах проекту.

Позначення на схемах автоматизації електроапаратури на стадії робочої документації або в разі одностадійного проектування мають відповідати таким позначенням, як на принципових електричних схемах.

Визначаючи межі кожної функціональної групи, слід враховувати таку обставину: якщо прилад чи регулятор сполучений з декількома датчиками або отримує додатковий вплив від іншого параметра (наприклад, коригувальний сигнал), то всі елементи схеми, що виконують додаткові функції, належать до тієї функціональної групи, на яку вони впливають. Регулятор співвідношення, зокрема, входить до складу тієї функціональної групи,

---

<sup>20</sup> У практиці проектування систем контролю та керування на схемах автоматизації замість «нейтрального» цифро-літерного чи цифрового позначення позицій пускових пристроїв часто застосовують літерно-цифрові, в яких букви є абrevіатурою від назви пристроїв (див. рис. 5.3, 5.4), а цифри – порядковими номерами пристроїв серед їм подібних: магнітні пускачі – МП1, МП2, магнітні контактори – КМ1, КМ2, кнопки запобіжного відмикання пускових пристроїв – КВ1, КВ2 тощо.

на яку він чинить головний вплив по координаті незалежного параметра (див. дод. 1). Те саме стосується й прямого цифрового керування, де входним ланцюгам контура регулювання надається одна й та сама позиція.

У системах централізованого контролю із застосуванням обчислювальної техніки, системах телевимірювання та у складних схемах автоматичного керування із загальними для різних функціональних груп пристроями всі спільні елементи виносять у самостійні функціональні групи.

Приклади побудови схем автоматизації контролю та регулювання технологічних параметрів (окремих контурів) наведено в дод. 1, 2.

## **5.6. ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПРИКЛАДИ ВИКОНАННЯ СХЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ**

Схему автоматизації виконують у вигляді креслення, на якому схематично показують: технологічне устаткування, комунікації, органи керування та засоби автоматизації із зазначенням зв'язків між технологічним устаткуванням і засобами автоматизації, а також зв'язків між окремими функціональними блоками та елементами автоматики.

Умовні зображення слід виконувати лініями такої товщини:

- 1) технологічного устаткування:
  - у вигляді прямокутників довільних розмірів – 0,5...1 мм;
  - з відображенням характерних ознак устаткування – 0,2...0,5 мм;
- 2) трубопроводів – 0,5...1,5 мм;
- 3) умовні зображення засобів автоматизації (крім горизонтальної лінії на зображенні приладів, розміщених на щитах і пультах) – 0,5...0,6 мм;
- 4) лінії зв'язку між засобами автоматизації та горизонтальні лінії на зображенні приладів, розміщених на щитах і пультах, – 0,2...0,3 мм;
- 5) щити та пульти (прямокутники внизу схеми) – 0,5...1 мм.

Схеми автоматизації можна розробляти з більшим чи меншим ступенем деталізації. Однак обсяг інформації, поданий на схемі, має давати повне уявлення про прийняті основні рішення з автоматизації певного технологічного процесу, а також забезпечувати можливість складання на стадії проекту заявочних відомостей на прилади і засоби автоматизації, трубопровідну арматуру, щити й пульти, основні монтажні матеріали та вироби. Схему автоматизації зазвичай виконують на одному аркуші, на якому зображують засоби автоматизації й апаратуру всіх систем контролю, регулювання, керування та сигналізації, що належать до певної технологічної установки. Допоміжних пристроїв (редукторів і фільтрів для повітря, джерел живлення, реле, автоматів, вимикачів та запобіжників у ланцюгах живлення, з'єднувальних коробок, інших пристроїв та монтажних елементів) на схемах автоматизації не показують.

Складні технологічні схеми рекомендується розбивати на окремі технологічні вузли і виконувати схеми автоматизації цих вузлів у вигляді окремих креслень. Для технологічних процесів з великим обсягом автоматизації схеми автоматизації можуть бути виконані окремо за видами технологічного

контролю та керування. Наприклад, окремо виконують схеми автоматичного керування, контролю та сигналізації тощо.

Стандартом встановлено два способи виконання схем автоматизації:

1) *розгорнутий*, у якому на схемі зображують склад і місце розташування технічних засобів автоматизації кожного контура контролю та керування. Розгорнутий спосіб побудови умовних графічних позначень можна виконувати комбінованим застосуванням основних (табл. 5.2, 5.3) та додаткових (табл. 5.4, 5.5) умовних позначень. При цьому щити та пульти керування зображують у вигляді прямокутників (зазвичай у нижній частині креслення), в яких показують встановлені на них засоби автоматизації;

2) *спрощений*, у якому на схемі зображують основні функції контурів контролю та керування (без виділення окремих технічних засобів автоматизації, що до них входять, та зазначення місця їх розташування). Засоби автоматизації на технологічних схемах зображують поблизу відбірних та приймальних пристроїв без побудови прямокутників, які умовно показують щити, пульти, пункти контролю і керування. Для спрощеного способу побудови достатньо основних умовних позначень, наведених у табл. 5.2, та літерних позначень, наведених у табл. 5.3.

Виконуючи схеми розгорнутим способом, на них показують всі пристрої та засоби автоматизації, що входять до складу функціонального блока чи групи, а також місце їх встановлення. Перевага цього способу – більша наочність, що значно полегшує читання схеми й опрацювання проектних матеріалів, а також дає змогу складати замовні специфікації на потрібні для реалізації розробленої схеми автоматизації устаткування, вироби та матеріали. Приклад виконання схеми автоматизації розгорнутим способом показано на рис. 5.2.

На схемі двома прямокутниками позначено «Прилади місцеві» та «Щит колони». Лінії зв'язку між датчиками та відбірними пристроями, встановленими на технологічному обладнанні, приладами та засобами автоматизації, встановленими на місцях і на щиті колони, виконано з розривами. На відміну від безперервного з'єднання технічних засобів автоматизації, що входять до конкретного контура контролю чи регулювання, лініями зв'язку, цей метод з'єднання називають адресним.

На відрізках ліній зв'язку, прилеглих до прямокутника «Прилади місцеві», вказують граничнодопустимі робочі значення вимірюваних і регульованих параметрів ( $x \ x \ x \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $y \ y \ y \text{ МПа}$  тощо).

Усі комплекти апаратури контролю й автоматизації мають цифрове позиційне позначення. Наприклад, витрата сировини регулюється комплектом пневматичних технічних засобів автоматизації, що складається з діафрагми 3-1, безшкального дифманометра 3-2 (забезпечує дистанційне передавання сигналів, має квадратичну функцію перетворення), оснащеного станцією керування вторинного приладу 3-3, регулятора 3-4 і виконавчого механізму 3-5, тобто цьому комплекту присвоєно номер 3, а його складовим частинам – через дефіс – цифрові індекси 1, 2, 3, 4, 5.

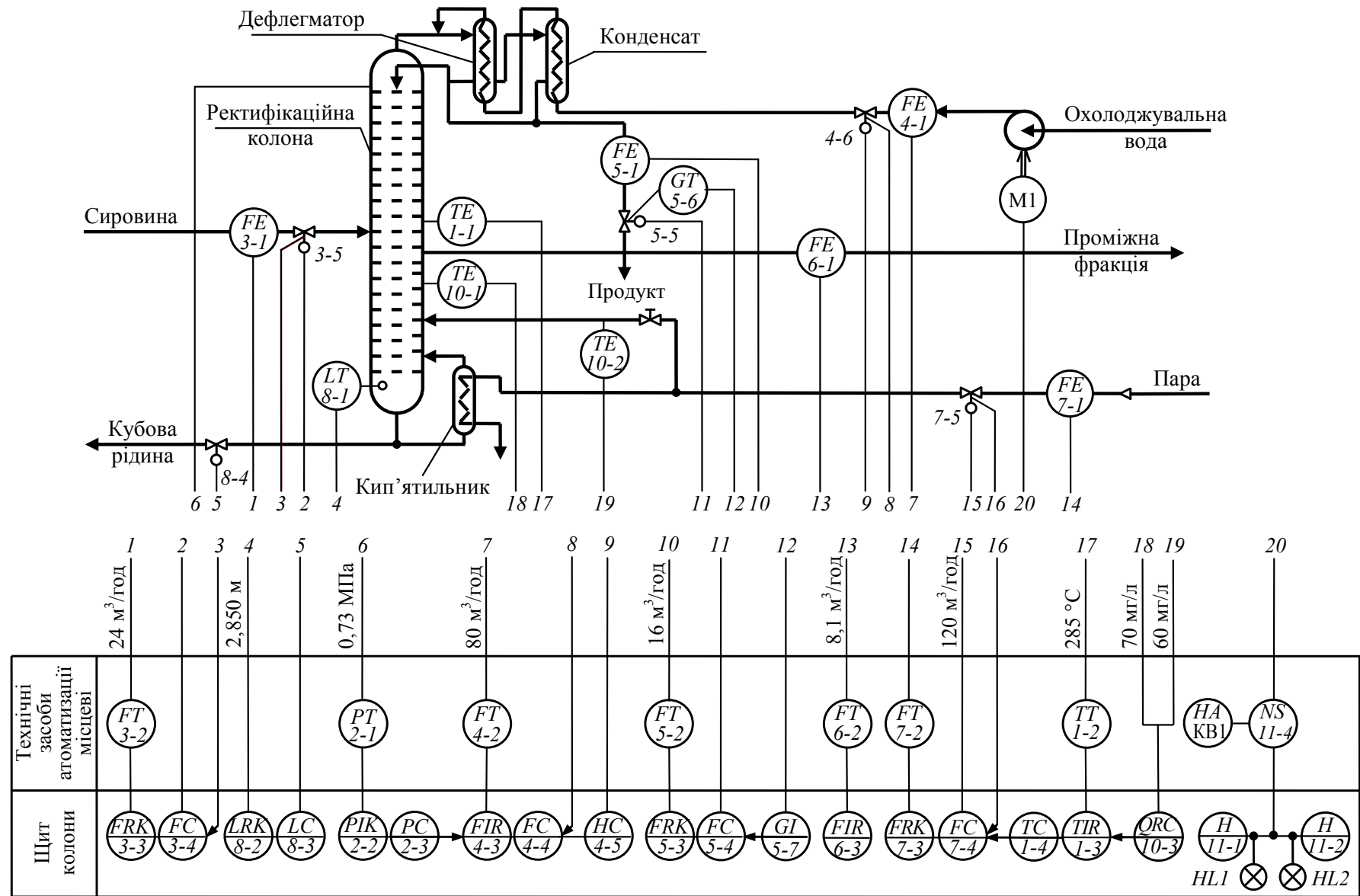


Рис. 5.2. Приклад виконання схеми автоматизації розгорнутим способом

Комплект для вимірювання тиску в колоні має номер 2, комплект для регулювання подачі охолоджувальної води – номер 4, комплект для регулювання відбирання продукту – номер 5 (у цьому контурі регулювання додатково впроваджено зворотний зв'язок за положенням вихідного органа виконавчого механізму), комплект для регулювання рівня у кубі колони – номер 8 тощо.

Чинні нормативні документи, що зазвичай не змінюються тривалий час, не можуть передбачити наперед усіх нововведень у зображення схем автоматизації, які можуть знадобитися у зв'язку з тим, що номенклатура технічних засобів автоматизації безперервно і доволі швидко збільшується, і це, в свою чергу, спричинює нові варіанти їх застосування. Так, із виходом на ринок систем керування технологічними процесами мікроконтролерів унормовані стандартами «класичні» схеми автоматизації на базі локальних засобів вже не відповідали новим технічним і структурним можливостям, надаваним мікроконтролерами, зокрема використовувани в цих схемах літерні позначення функціональних ознак приладів далеко не вичерпували всіх функцій, що реалізовувалися мікроконтролерами.

З огляду на це головні розробники схем автоматизації – різні проектні організації – вдалися до заповнення прогалин у цій царині власними розробками, виходячи зі свого досвіду та бачення підходів до розв'язання проблеми (зайве наголошувати, що на відміну від регламентованих стандартами, ці розробки не вирізнялися одноманітністю). Та згодом бурхливе розширення номенклатури і функціональних можливостей цифрових приладів на базі мікропроцесорної техніки, яке спостерігається останніми роками, спонукало вдосконалювати й «мікроконтролерні» схеми автоматизації.

Тож залежно від технічного наповнення тієї чи тієї розробленої системи керування можна застосовувати й відповідні варіанти зображення схем автоматизації. На рис. 5.3 показано один з можливих варіантів реалізації попередньої (рис. 5.2) схеми автоматизації на мікроконтролерах типу «Реміконт», «Ломіконт», КОНТРАСТ та ін. Пневматичні сигнали з виходів безшкальних дифманометрів (3-2, 4-2, 5-2 тощо) перетворюються в електричні сигнали для подачі їх на відповідні входи мікроконтролера пневмоелектричними перетворювачами (2-2, 3-3, 8-2 тощо). Замість локальних перетворювачів можна скористатися комплексом програмно-технічних засобів «АСТРА-8М», призначеним для введення в ЕОМ інформації від датчиків та інших пристроїв, що мають стандартний пневматичний вихід, а також для приймання від ЕОМ електричних сигналів і перетворення їх у стандартний пневматичний сигнал. Пунктирне позначення ручного дистанційного керування означає, що його можна застосовувати тільки після відключення автоматичного регулювання, яке є основним.

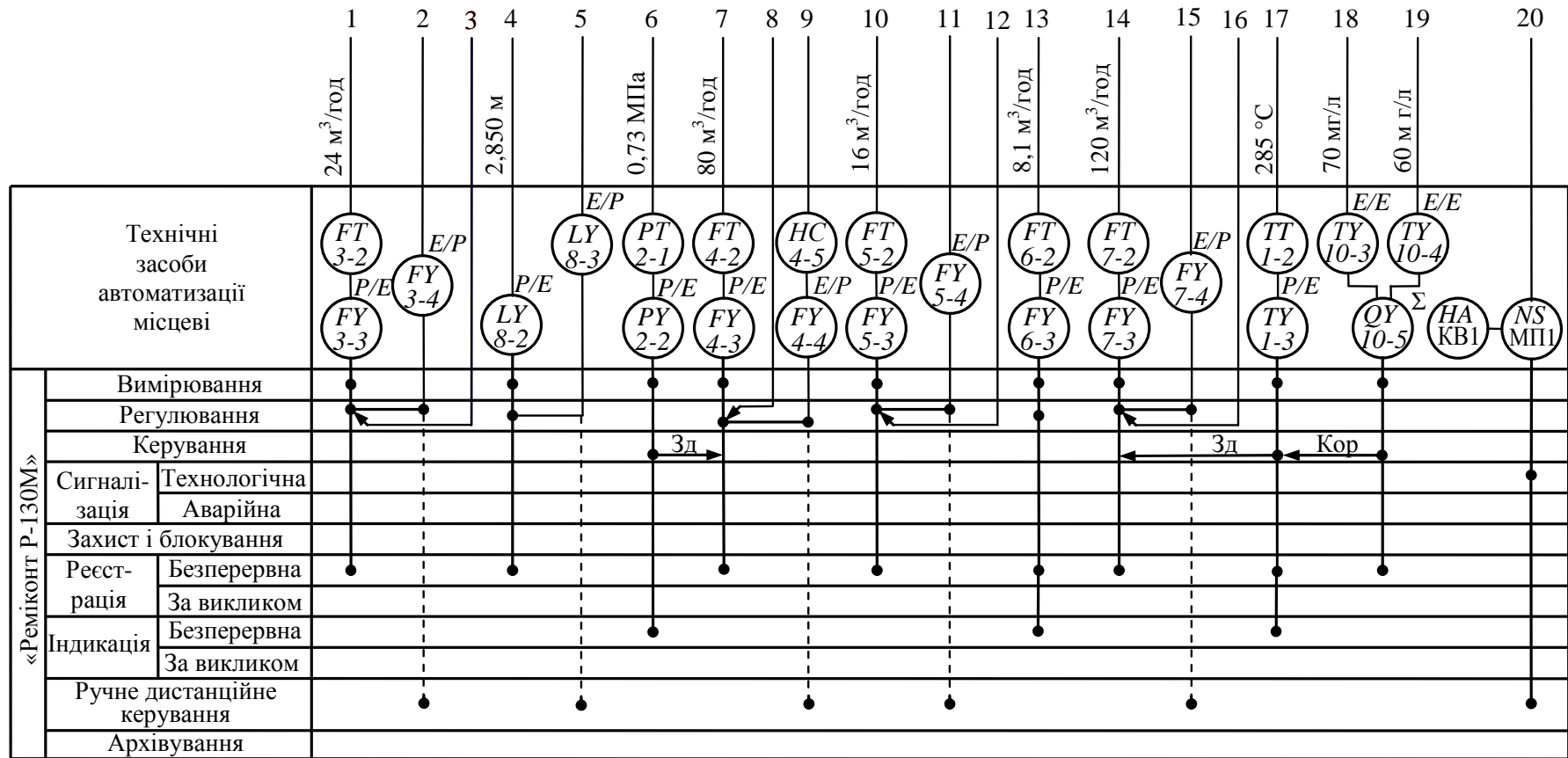
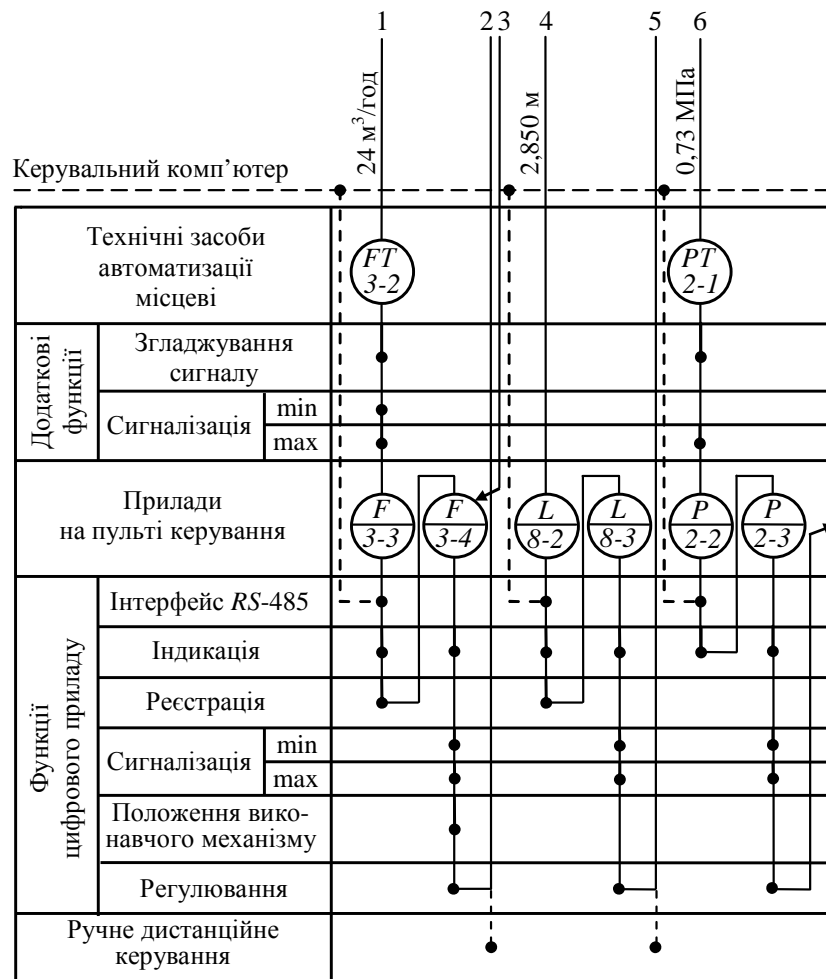
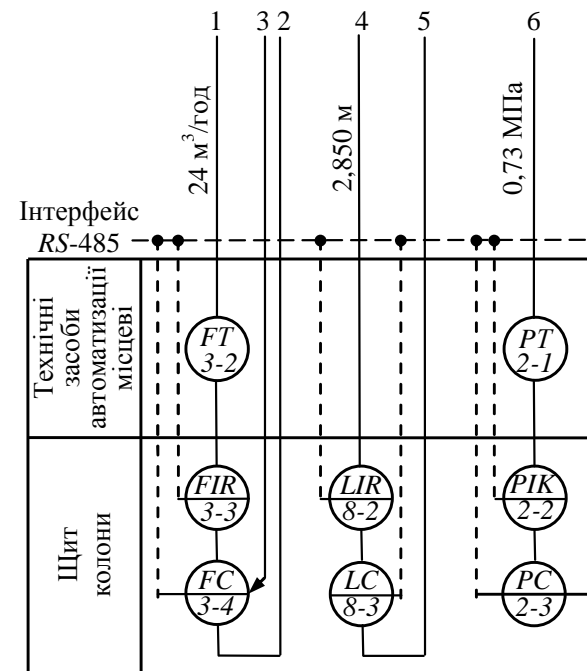


Рис. 5.3. Приклад виконання схеми автоматизації розгорнутим способом на базі мікроконтролера



a



б

Рис. 5.4. Приклади виконання схеми автоматизації розгорнутим способом із використанням цифрових приладів (фрагментарно): а – детальний варіант; б – спрощений варіант



Варіант схеми автоматизації того самого об'єкта (рис. 5.2), побудованої з використанням цифрових приладів, показано на рис. 5.4, *а* (фрагментарно, повну схему – див. [21]). Ця схема є своєрідним симбіозом двох попередніх: прилади на ній зображено так, як у «класичній» схемі на базі локальних засобів автоматизації (рис. 5.2), а численні функціональні можливості, надані цифровими приладами, – як у «мікроконтролерних» схемах автоматизації. Іноді вдаються до **спрощеного варіанту** такої схеми автоматизації (рис. 5.4, *б*) – на ній вказують не функціональні ознаки приладів, а лише їх зв'язок з КЕОМ чи мікроконтролером за допомогою відповідного інтерфейсу (наприклад, RS-485), а функціональні можливості визначаються можливостями КЕОМ чи мікроконтролера.

Для пристроїв, що показують положення вихідних органів виконавчих механізмів тощо (графічні умовні позначення наведено в табл. 5.6, п. 30, 31), потрібно показувати наявний механічний зв'язок з вихідним органом виконавчого механізму. Такі пристрої можуть бути як окремого виготовлення, так і вбудованими, щодо яких графічні умовні позначення не застосовують (рис. 5.2, поз. 3-5, 4-6, 7-5).

Спрощений спосіб побудови схем (рис. 5.5) хоч і дає лише загальне уявлення про прийняті рішення щодо автоматизації об'єкта, дозволяє суттєво зменшити обсяги проектної документації. Однак читання схем автоматизації, виконаних у такий спосіб, ускладнено тим, що вони не повно відображають організацію пунктів контролю і керування об'єктом, а складання специфікації на використані засоби автоматизації за такою схемою взагалі неможливе. Регулювальні пристрої зображено на схемі технологічного процесу поблизу відбірних пристроїв та датчиків і позначено відповідними арабськими цифрами, представленими в нижній частині кола, що зображує регулювальний пристрій. Виконавчі механізми та відбірні пристрої позиційних позначень не мають.

Іноді застосовують і комбінований метод зображення, який передбачає показування засобів автоматизації здебільшого розгорнено, однак деякі вузли зображаються спрощено.

Прилади та засоби автоматизації, вбудовані в технологічне обладнання та комунікації чи механічно пов'язані з ним, зображають на кресленні в безпосередній близькості від них (виконавчі механізми, регулювальні та запірні органи). Для полегшення розуміння особливостей автоматизованого технологічного процесу, можливості вибору діапазонів вимірювання та шкал приладів, визначення уставок (завдань) регуляторів на схемах автоматизації вказують граничнодопустимі робочі (максимальні чи мінімальні) значення вимірюваних чи регульованих технологічних параметрів за сталих режимів роботи. Ці значення в одиницях вибраної шкали приладу або в міжнародній системі одиниць вказують на лініях зв'язку, прилеглих до прямокутника «Прилади місцеві» (див. рис. 5.2...5.4). Для приладів, вбудованих безпосередньо в технологічне обладнання чи трубопроводи (термометрів розширен-

ня, манометрів, витратомірів постійного перепаду тощо) та розміщених поза згаданими прямокутниками, граничнодопустимі значення параметрів вказують під позиційним позначенням приладів чи поблизу позначень.

Над рамкою з основним написом по її ширині (так зване *вільне поле* схеми) зверху вниз на першому аркуші креслення подають таблицю не передбачених стандартами умовних позначень, прийнятих у цій схемі автоматизації; там же розміщують експлікацію на технологічне устаткування (номер позиції, назву, кількість однотипних одиниць) і позначення (нумерацію) трубопроводів, не наведених у табл. 5.1 (починаючи з цифри 28). У разі потреби таблиці можна виконувати на окремих аркушах.

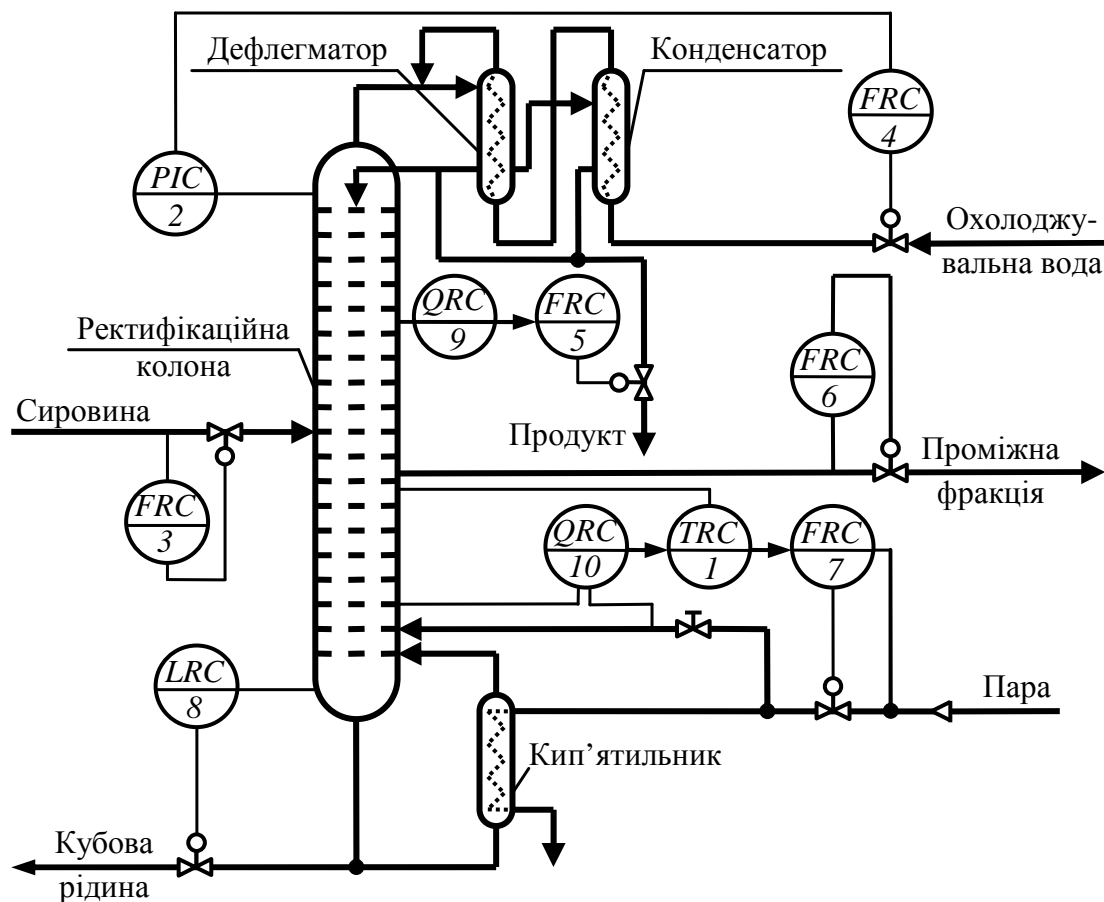


Рис. 5.5. Приклад виконання схеми автоматизації спрощеним способом

На кресленнях схем автоматизації мають бути наведені пояснення, на підставі яких документів їх розроблено. Допускається на вільному полі схеми подавати стисло технічну характеристику об'єкта, що автоматизується, пояснювальні таблиці, діаграми тощо. Пояснювальний текст можна розміщувати і в будь-якому іншому вільному місці схеми.

У разі виконання схем автоматизації обома способами відбірний пристрій для всіх постійно підключених технічних засобів автоматизації не має спеціального позначення, а являє собою тонку суцільну лінію, що з'єднує технологічний трубопровід чи апарат з первинним вимірювальним перетво-

ривачем чи приладом. Якщо потрібно вказати точне місце розташування відбірного пристрою чи точки вимірювання (всередині контура технологічного апарата), на кінці тонкої суцільної лінії зображують коло діаметром 2 мм (див. первинний перетворювач 8-1 на рис. 5.2).

Допускається запірну та регулювальну арматуру (наприклад, засувки, заслінки, шибери, напрямні апарати тощо), яка бере участь у системах автоматизації і замовляється в технологічній частині проекту, зображувати на схемах автоматизації відповідно до чинних у тій частині стандартів.

Виконуюючи креслення схеми автоматизації, слід уникати дублювання однакових її частин, які належать як до технологічного устаткування, так і до засобів автоматизації. Для однотипних об'єктів, які мають однако-ве оснащення і не пов'язані між собою, схему автоматизації виконують лише для одного об'єкта і додають, наприклад, пояснення: *«Схему складено для агрегату 1; для агрегатів 2–6 схеми аналогічні»*.

Схема автоматизації обов'язково доповнюється специфікацією на використані в ній технічні засоби автоматизації. Специфікацію складають у вигляді таблиці (дод. 2) і подають у кінці пояснювальної записки до проекту. У специфікації наводять позиції технічних засобів згідно зі схемою автоматизації, вимірюваний параметр та його граничнодопустиме (номінальне, середнє) значення, місце відбору інформації, місце монтажу технічного засобу, його найменування та повну технічну характеристику, загальну кількість однотипних одиниць, завод-виробник тощо. Технічні засоби (первинні та проміжні перетворювачі, вторинні прилади, регулятори, виконавчі механізми, монтажні вироби, матеріали тощо) підбирають за допомогою каталогів і довідників на технічні засоби автоматизації, що серійно виробляються промисловістю, а також за рекламними та номенклатурними довідниками виробників і торговельних організацій.

## **5.7. СХЕМИ СИГНАЛІЗАЦІЇ, БЛОКУВАННЯ ТА ЗАХИСТУ**

Технологічні процеси сучасних хімічних виробництв характеризуються оптимальними значеннями параметрів, які у багатьох випадках наближаються до критичних значень. У певних випадках навіть невеликі відхилення параметрів від їх оптимальних значень можуть знизити ефективність функціонування установки і навіть спричинити аварійні ситуації. У зв'язку з цим під час проектування й експлуатації промислових установок велике значення надають питанням забезпечення контролю за перебігом технологічного процесу. У свою чергу, надійність і вірогідність технологічного контролю значною мірою визначається використовуваними системами та пристроями технологічної сигналізації, захисту та блокування.

Пристрої (схеми) сигналізації призначені для автоматичного сповіщення персоналу про відхилення параметрів процесу за допустимі межі подаванням світлових чи звукових сигналів. Для світлової сигналізації використовують електричні лампи, для звукової – дзвінки, сирени, гудки. Найчастіше звуковий сигнал служить лише для сповіщення оператора про

певну подію, а світловий точно вказує на її місце (зазвичай на мнемосхемі процесу) та характер. Сигналізацію поділяють на технологічну (попереджувальну й аварійну) та сигналізацію положення.

*Попереджувальна сигналізація* призначена для сповіщення персоналу про відхилення параметрів процесу за межі, обумовлені нормальним технологічним режимом. Аварійна сигналізація призначена для оповіщення персоналу про неприпустимі значення параметрів або про аварійне відключення одного з апаратів технологічної схеми, вона дає змогу вчасно виявляти аварійні ситуації й автоматично вжити оперативних заходів для запобігання аваріям. Сигналізація положення об'єкта керування призначена для сповіщення персоналу про стан механізмів і машин (увімкнені чи вимкнені), а також про положення запірних органів (відкриті чи закриті) на даний момент часу. Цей вид сигналізації реалізується за допомогою сигнальних ламп.

Пристрої сигналізації істотно спрощують роботу оператора, позбавляючи від необхідності невідривно стежити за ходом процесу.

*Пристрої (схеми) захисту* призначені для запобігання аваріям, пожежам, вибухам, виходу з ладу технологічного устаткування. У разі спрацювання аварійної сигналізації вони впливають на процес (відкриваючи та закриваючи технологічні магістралі, вмикаючи та вимикаючи електродвигуни механізмів і машин) так, щоб ліквідувати критичний стан об'єкта керування з найменшими втратами (наприклад, з виникненням вібрації ротора центрифуги внаслідок порушення рівномірності осаду пристрій захисту здійснює її зупинку, а в разі припинення подачі нагріваної рідини у змішувачі трубчастій печі перекидає подачу палива, щоб запобігти прогоранню труб).

*Пристрої (схеми) блокування* запобігають неприпустимим, помилковим діям оперативного персоналу, визначають регламентовану послідовність операцій з відключення технологічного устаткування. Ці пристрої (схеми) мають особливо важливе значення у разі комплексної автоматизації, коли велика кількість технологічних об'єктів автоматизується як єдине ціле. Увімкнення та вимкнення їх має здійснюватись у строго визначеному порядку, інакше може статися аварія. Наприклад, групу послідовно працюючих транспортерів необхідно вмикати проти ходу транспортованого матеріалу, тобто першим повинен вмикатися останній по ходу матеріалу транспортер, а вимикати – у зворотному порядку. Порушення зазначеної послідовності може спричинити завал транспортерів матеріалом.

Розглянемо декілька прикладів побудови наведених схем.

### **5.7.1. Схеми сигналізації**

Схема технологічної сигналізації має забезпечувати одночасне подавання світлового та звукового сигналів; знімання звукового сигналу (натисканням кнопкового вимикача); повторність спрацьовування виконавчого пристрою звукової сигналізації (у разі повторного відхилення параметра) після його відключення натисканням кнопкового вимикача; перевірку виконавчих пристроїв сигналізаторів (світлових і звукових) від одного кнопкового вимикача.

Деякі вимірювальні прилади мають убудовану контактну систему, яку можна безпосередньо використовувати для вмикання ламп, дзвінків тощо. Такі прилади разом із виконавчими пристроями сигналізації (лампами, дзвінками тощо) можна встановлювати біля апаратів (в особливих випадках і ті й другі повинні мати пожежовибухозахищене виконання).

На рис. 5.6 наведено функціональні схеми технологічної сигналізації одного параметра, що використовуються на промислових підприємствах.

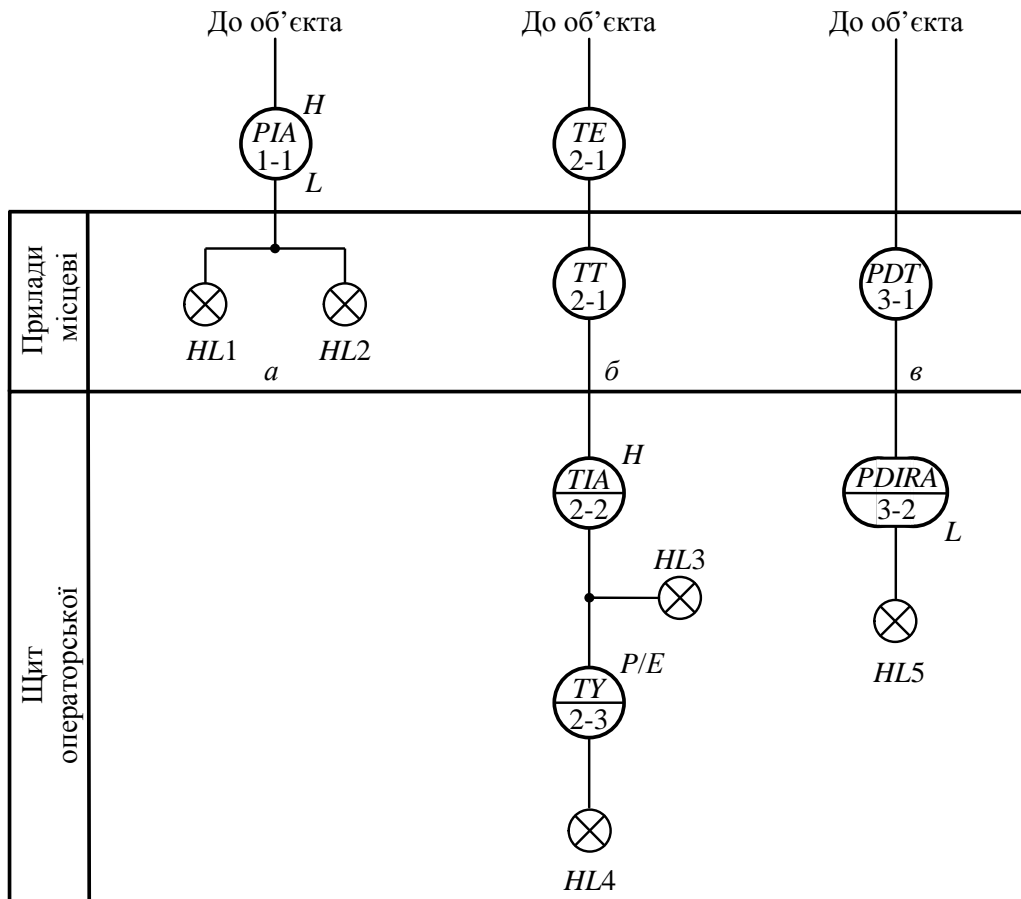


Рис. 5.6. Функціональні схеми технологічної сигналізації:

*a* – схема місцевої сигналізації; *б, в* – схеми дистанційної сигналізації;

1-1 – електроконтактний манометр; *HL1, HL2, HL4, HL5* – лампи електричні сигнальні; *HL3* – лампа пневматична сигнальна; 2-1 – манометричний термометр (термобалон і проміжний перетворювач – пристрій дистанційної передачі сигналу, наприклад, пневматичний вимірювальний перетворювач різниці тисків 13ДД11); 2-2 – пневматичний показувальний вторинний прилад ПКП.1П з пневматичною сигналізацією граничних значень (здіяна сигналізація тільки верхнього значення); 2-3 – пневмоелектричний перетворювач ППЕ; 3-1 – тензометричний вимірювальний перетворювач різниці тисків серії «Сафір» («Сапфир»); 3-2 – відповідний самописний вторинний прилад (наприклад, серій ДИСК-250; РМТ, КС-2 тощо), оснащений пристроєм сигналізації (здіяна сигналізація тільки нижнього значення)

Розглянемо деякі принципи електричні схеми сигналізації. У схемі технологічної сигналізації без проміжного реле (рис. 5.7, *a*) у разі замикання технологічного контакту *K2* вимірювального приладу вмикається

сигнальна лампа *HL*. Паралельно лампі можна підключити звуковий сигналізатор *HA* (дзвінок, гудок тощо). Вада такої схеми полягає в тому, що дзвінок працює увесь час, поки замкнуто контакт *K2*. Якщо контакт приладу має недостатню розривну потужність, у схему вводять проміжне реле (катушка реле *KM1* на рис. 5.7, б). У випадку, коли сигнальна лампа розрахована на меншу напругу, ніж напруга живлення схеми, послідовно з лампою встановлюють резистор. Це сприяє також збільшенню терміну служби лампи.

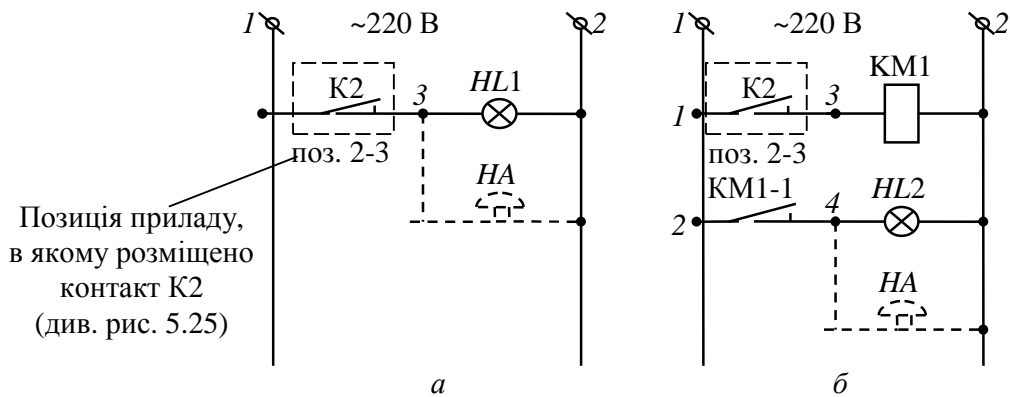


Рис. 5.7. Принципові електричні схеми технологічної сигналізації:  
*a* – без проміжного реле; *б* – із проміжним реле

Надійність схеми сигналізації можна підвищити, використавши дві паралельно підключені лампи для сигналізації про один параметр. У такому разі немає нагальної потреби створювати окреме коло перевірки ламп.

Всі основні специфічні вимоги до технологічної сигналізації виконано на рис. 5.8. У разі замикання контакту приладу *K2* вмикаються дзвінок *HA* і лампа *HL1*. Для зняття звукового сигналу необхідно натиснути кнопковий вимикач *SB2*. У цьому разі реле *KM2* контактом *KM2-2* вимикає дзвінок *HA*, а контактом *KM2-1* самоблокується.

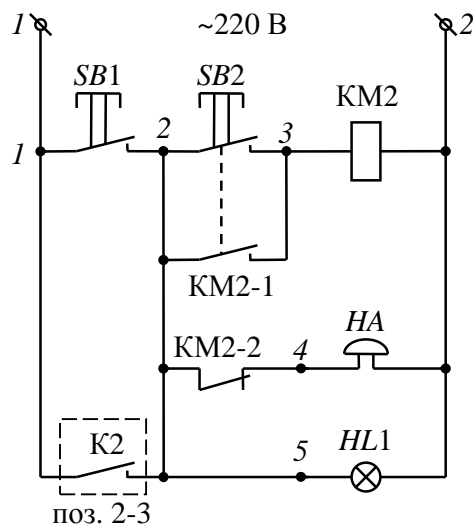


Рис. 5.8. Схема технологічної сигналізації на один параметр

Як тільки контакт К2 розімкнеться, схема знову готова для подачі звукового сигналу. Натисканням кнопочового вимикача SB1 перевіряється справність дзвінка і лампи. У разі недостатньої розривної потужності контакту К2 у схему вводять проміжне реле (див. рис. 5.7, б).

На рис. 5.9 показано принципову схему сигналізації температури та тиску. За визначеного відхилення температури в об'єкті від заданого значення замикається технологічний контакт К3 (у вторинному приладі 3-3 контура автоматичного контролю температури – див. рис. 5.6).

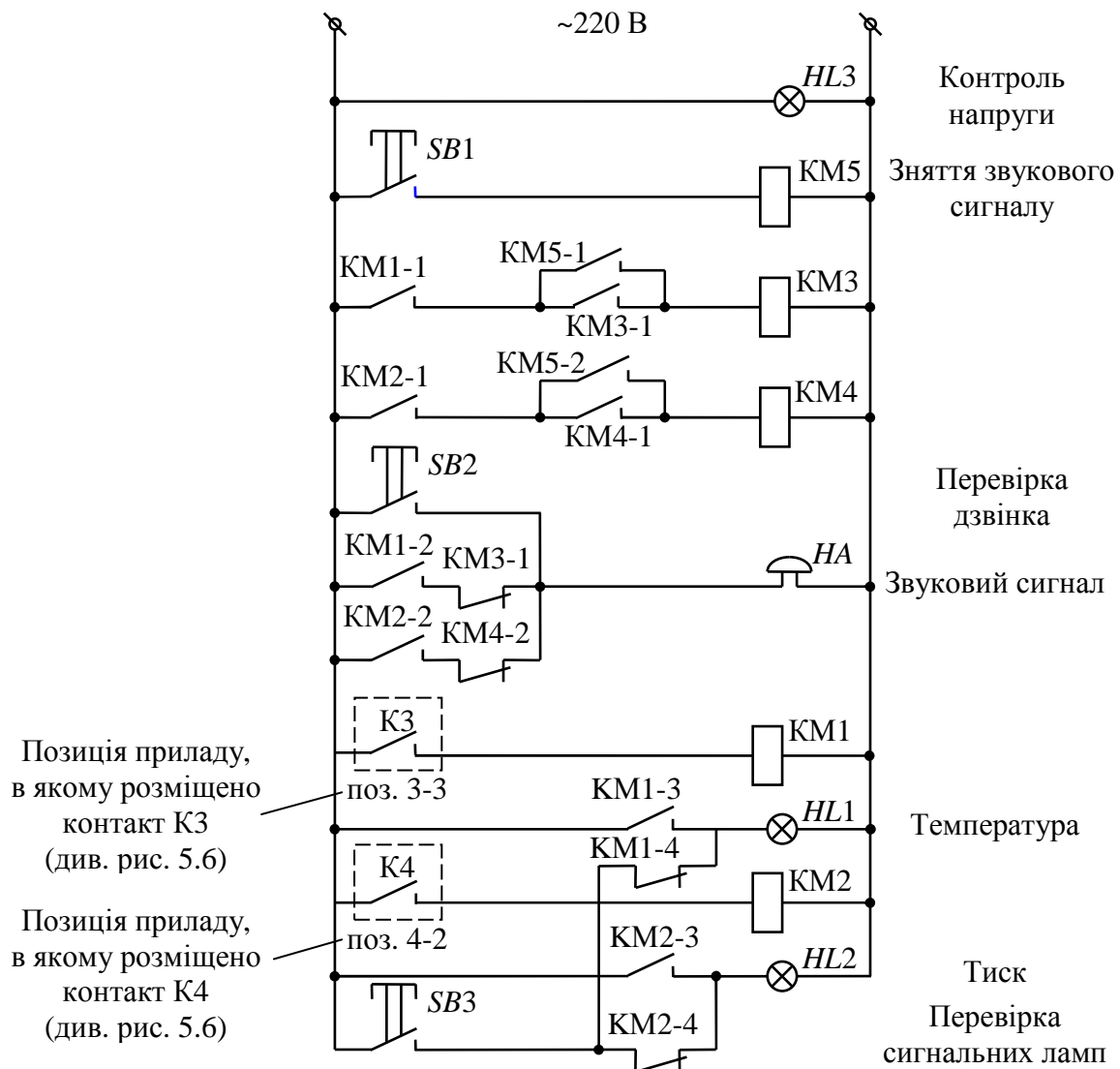


Рис. 5.9. Принципова схема технологічної сигналізації температури та тиску

Спрацьовує реле KM1, замикаються контакти KM1-1, KM1-2, KM1-3 і розмикається контакт KM1-4. Контакт KM1-1 готує коло для спрацювання реле KM3. Контакт KM1-2 вмикає дзвінок HA. Контакт KM1-3 вмикає лампу HL1 (сигналізація верхнього значення температури). Контакт KM1-4 запобігає помилковому спрацюванню лампи HL2 (сигналізація нижнього

значення тиску) у разі замикання контакту КЗ. Для відключення дзвінка натискають кнопковий вимикач *SB1*. Спрацьовує реле *KM5*, і замикається контакт *KM5-1*. При цьому спрацьовує реле *KM3*, яке самоблокується замикальним контактом *KM3-1*. Розмикається контакт *KM3-2*, і дзвінок *HA* відключається – схема готова до увімкнення дзвінка у разі замикання іншого технологічного контакту *K4* (у вторинному приладі 4-2 контура автоматичного контролю та сигналізації тиску – див. рис. 5.6).

Для перевірки справності дзвінка і ламп натискають кнопкові вимикачі відповідно *SB2* та *SB3*.

### 5.7.2. Схеми блокування

*Схеми блокувальних залежностей електродвигунів.* У випадку, коли потрібно запобігти можливості запуску електродвигуна *M2* без попереднього пуску електродвигуна *M1*, застосовують схему, показану на рис. 5.10. Контакт *KM1-2* магнітного пускача *KM1* електродвигуна *M1* вводиться в коло магнітного пускача *KM2* електродвигуна *M2*. Тільки у разі замкнутого контакту *KM1-2* натискання на кнопковий вимикач *SB3* призведе до вмикання пускача *KM2*. Універсальний перемикач *SA* при цьому має перебувати в положенні «б» (блокування). У разі відключення електродвигуна *M1* контакт *KM1-2* у колі магнітного пускача *KM2* розмикається, вимикаючи електродвигун *M2*.

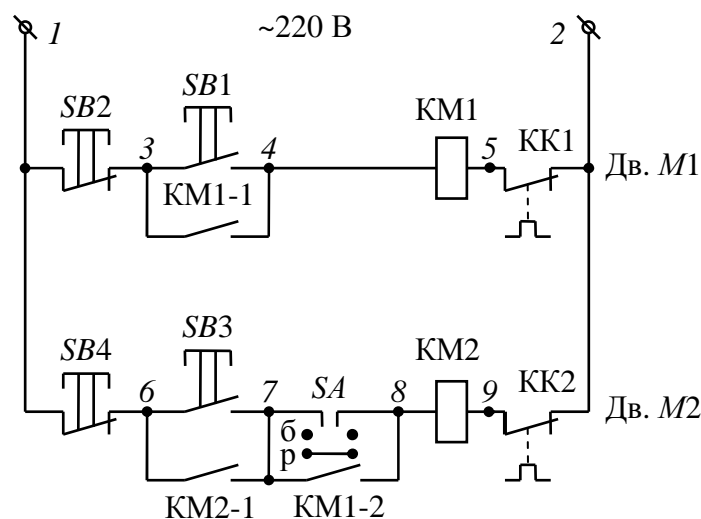


Рис. 5.10. Принципова схема керування двома заблокованими електродвигунами (з блокуванням пуску та зупинки)

У разі переведення перемикача *SA* у положення «р» (ручне керування) контакт *KM1-2* блокується, і стає можливим пуск електродвигуна *M2* незалежно від того, у якому стані перебуває електродвигун *M1*. Цей режим потрібен для випробування електродвигуна *M2*.





Мембранний блок зміщується вниз, при цьому сопло С1 закривається, а сопло С2 відкривається. Повітря з лінії мембранного виконавчого механізму скидається (через сопло С2 камери Б) в атмосферу, а клапан 2 цілком закривається або відкривається – залежно від його типу (НЗ чи НВ). За досягнення нормального тиску в об'єкті тиск повітря в камері В реле 4 стає рівним нулю, пружина, розміщена в камері А, піднімає мембранний блок уверх і схема набуває первісного стану.

Після спрацювання пристроїв захисту автоматичне відновлення нормального функціонування об'єкта у разі зникнення ознаки небезпеки часто неприпустиме, тому на лінії між позиційним регулятором 1-1 і реле 4 встановлюють зворотний клапан КЗ і патрубок з голчастим вентилям ВГ (рис. 5.12, б). Для відновлення нормального режиму роботи схеми після спрацювання пристроїв захисту необхідно відкрити вентиль ВГ для скидання тиску повітря і знову закрити його.

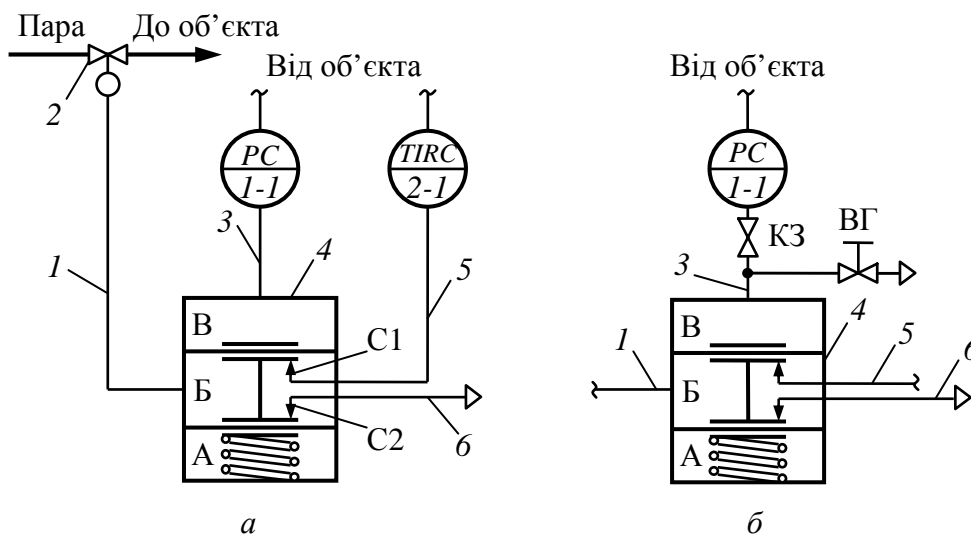


Рис. 5.12. Схема захисту простого об'єкта з використанням регулювального органа:  
*а* – без перемикача; *б* – з пристроєм ручного відновлення нормального режиму;  
 1-1 – позиційний регулятор; 2-1 – вторинний показувальний самописний прилад із убудованим регулятором; 1, 3, 5, 6 – пневматичні лінії; 2 – регулювальний клапан;  
 4 – перемикальне реле; С1, С2 – сопла; КЗ – клапан зворотний; ВГ – вентиль голчастий

За потреби впливати одночасно на кілька магістралей (у випадку небезпечного відхилення одного параметра) застосовують схему, наведену на рис. 5.13, *а*.

Наприклад, за підвищення тиску в об'єкті позиційний регулятор 1-2 посилає одиничний сигнал на виконавчий механізм триходового клапана 1-3, який перекриває доступ стиснутого повітря в гребінку й одночасно скидає залишок повітря з гребінки в атмосферу. При цьому клапани, керувані регуляторами, та відсічні клапани цілком закриваються чи відкриваються залежно від їх типу (НЗ чи НВ). Під час роботи схеми захисту вентиль 1 має бути закритий, а вентиля 2 та 3 відкриті.

Якщо потрібно здійснити захист об'єкта за трьома параметрами, то схему виконують, як показано на рис. 5.13, б.

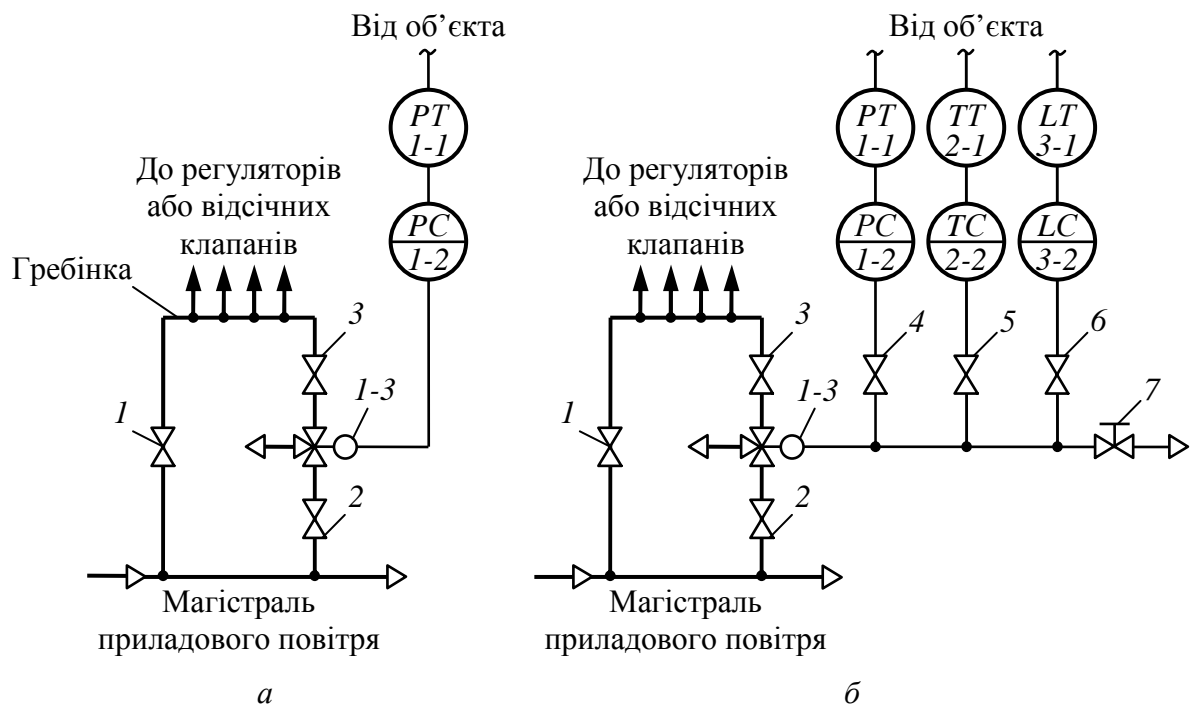


Рис. 5.13. Схема захисту складного об'єкта:  
*а* – за допомогою триходового клапана; *б* – з використанням зворотних клапанів для розв'язки позиційних регуляторів; 1-1-3-1 – передавальні перетворювачі; 1-2-3-2 – позиційні регулятори; 1-3 – триходовий клапан; 1-3 – запірні вентиля;  
 4-6 – зворотні клапани; 7 – голчастий ventиль

Зворотні клапани 4, 5, 6 запобігають виходу повітря в атмосферу через позиційні регулятори, що не спрацювали. Голчастим ventилем 7 повертають схему захисту до вихідного стану. За частково відкритого голчастого ventиля схема захисту самостійно повертається у вихідний стан після відновлення нормального значення параметра.

### Контрольні запитання та завдання

1. Чим регламентовано правила розроблення схем автоматизації? Якими загальними принципами слід керуватися, розробляючи схеми автоматизації?
2. Що і як зображують на схемах автоматизації?
3. Які цифрові позначення трубопроводів для рідин та газів передбачено чинним стандартом?
4. Які основні та додаткові значення мають літери в умовних літерних позначеннях технічних засобів автоматизації?
5. У чому полягає методика побудови умовних графічних позначень засобів автоматизації?
6. Які способи виконання схем автоматизації встановлює стандарт? Наведіть переваги, притаманні кожному з них.
7. У чому полягають особливості подання схем сигналізації, блокування та захисту?

## 6. КОНТРОЛЬ І КЕРУВАННЯ У ХІМІЧНИХ ТА НАФТОХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВАХ

### 6.1. ЗАГАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО ВИРОБЛЕННЯ СТРАТЕГІЇ КЕРУВАННЯ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

Важливий етап автоматизації технологічних процесів – розроблення стратегії керування об'єктом, яка серед іншого передбачає вибір параметрів контролю та керування, а також відповідних керувальних впливів. Використовуючи мінімально можливу кількість обраних параметрів, потрібно отримати найбільш повну інформацію про стан ТОК, яка забезпечить ефективне керування його роботою. Успішному досягненню мети керування сприяє також правильний вибір засобів автоматизації для реалізації розробленої стратегії керування.

**Вибір регульованих величин і каналів введення регульовальних впливів.** На цьому етапі з багатьох параметрів, які характеризують керований процес, слід вибрати ті, що підлягають регулюванню (регульовані параметри), а також ті, зміною яких доцільно завдавати регульовальні впливи для досягнення мети керування (регульовальні параметри). Упоратися з поставленим завданням можна лише за результатами аналізу цільового призначення процесу і його взаємозв'язку з іншими процесами виробництва. Виходячи з результатів аналізу, вибирають критерій керування, його задане значення і параметри, зміною яких найбільш доцільно на нього впливати. Це робиться на підставі статичних і динамічних характеристик процесу, що дають уявлення про взаємозалежність параметрів. Перші дають змогу оцінити ступінь впливу одних параметрів на інші, другі – уточнити правильність вибору.

Канал регулювання вибирають так, щоб регульовальний вплив (зміна витрати, температури, тиску) супроводжувався максимальною і швидкою зміною регульованої величини, тобто щоб коефіцієнт підсилення об'єкта у цьому каналі був максимальним.

Зауважимо, що через взаємозв'язок параметрів регульовальні впливи, спрямовані на регулювання одного параметра, впливають і на інші. Наприклад, зміна кількості пари, подаваної в кип'ятильник ректифікаційної колони, здійснювана регулятором температури, впливає не тільки на температуру в кубі, але й на рівень рідини у ньому.

Використовують різні способи ослаблення внутрішніх зв'язків між окремими параметрами, зокрема це вибір як регульованих величин таких параметрів, які не зв'язані (чи слабо зв'язані) між собою; введення в ланцюг регулювання компенсуювальних зовнішніх зв'язків між регуляторами тощо.

**Вибір контрольованих величин.** Контролю підлягають ті параметри, за значеннями яких здійснюється оперативне керування технологічним процесом, а також його пуск і зупинення. До таких параметрів належать усі режимні та вихідні параметри, а також вхідні параметри, у разі зміни

яких в об'єкт будуть надходити збурення. Обов'язковому контролю підлягають параметри, значення яких регламентуються технологічною картою.

Параметри, що характеризують стан вибухонебезпечних ТОК, потрібно не тільки контролювати, але і реєструвати, а сигнал на пристрої контролю має надходити від декількох чутливих елементів; наприклад, на ресивери зі зрідженими газами та легкозаймистими рідинами варто встановлювати три вимірювачі рівня.

**Вибір сигналізованих величин.** Параметри сигналізації вибирають після аналізу ТОК щодо його вибухо- та пожежонебезпеки, токсичності й агресивності перероблюваних речовин, можливих аварій і нещасних випадків.

Передаварійній (а в разі потреби – і попереджувальній) сигналізації підлягають параметри, граничні значення яких можуть призвести до таких наслідків: вибуху й пожежі (наприклад, концентрація вибухонебезпечних речовин у технологічних апаратах, виробничих приміщеннях, робочій зоні відкритих зовнішніх установок); нещасних випадків (наприклад, концентрація токсичних речовин у приміщенні); аварії (наприклад, крайні положення рухомих частин устаткування); виведення з ладу устаткування (наприклад, тиск в апаратах, температура в реакторах з каталізаторами); істотного порушення технологічного режиму (наприклад, витрата домішок, що ініціюють процес, рівень рідини в апараті); випуску некондиційної продукції та браку (наприклад, важливіші режимні параметри).

Сигналізації підлягає зміна кількісних і якісних характеристик цільових продуктів, а також не передбачене технологічним регламентом зупинення окремих агрегатів.

**Вибір параметрів і способів захисту.** Оперативний технологічний персонал у разі оповіщення його пристроями сигналізації про небажані події повинен ужити відповідних заходів щодо їх ліквідації. Якщо ці заходи виявляться неефективними і параметр, що характеризує стан ТОК, досягне аварійного значення, мають спрацювати системи протиаварійного захисту, які автоматично за заданою програмою перерозподіляють матеріальні та енергетичні потоки, вмикають і вимикають апарати об'єкта для запобігання вибуху, аварії, нещасному випадку, випуску великої кількості браку. При цьому ТОК має бути переведений у безпечний стан, аж до його зупинення. Повернення його в робочий стан здійснюється технологічним персоналом відповідно до регламенту виробництва.

У разі відключення живлення система протиаварійного захисту має забезпечити переведення ТОК у безпечний стан.

**Вибір засобів автоматизації.** Автоматичні пристрої і засоби обчислювальної техніки, що реалізують функції керування, бажано вибирати в межах Державної системи промислових приладів і засобів автоматизації з урахуванням складності об'єкта і його пожежо- та вибухонебезпеки, агресивності й токсичності навколишнього середовища, виду вимірюваного технологічного параметра та фізико-хімічних властивостей середовища, дальності передавання сигналів від датчиків і виконавчих пристроїв до пунктів керування, по-

трібної точності та швидкодії, допустимої похибки вимірювальних систем, місця встановлення пристрою, вимог правил монтажу електроустаткування. Зазначимо, що перевагу слід віддавати пристроям однотипним, централізованим і тим, які виробляються серійно. Це значно спростить постачання, а відтак і експлуатацію системи керування.

Дуже відповідальним є вибір засобів автоматизації для пожежо- та вибухонебезпечних ТОК. Зокрема, виробництва, у складі яких є блоки першої категорії вибухонебезпеки, потрібно оснащувати системами, обладнаними резервованими електронними засобами (зокрема ЕОМ і мікропроцесорною технікою) із самодіагностикою та світловою індикацією справного стану. Ці системи мають працювати за спеціальними програмами, що задають послідовність і час виконання операцій вимкнення у разі аварійних викидів. Високий рівень техніки має забезпечувати максимальне зниження імовірності помилкових дій технологічного персоналу.

Системи протиаварійного захисту мають виключати можливість спрацьовування їх за випадковими і короткочасними сигналами порушення нормального технологічного режиму, а також у разі переходу на резервне чи аварійне джерело живлення. У разі вимкнення живлення система повинна забезпечити переведення ТОК у безпечний стан.

## 6.2. ВИРОБНИЦТВО АМІАЧНОЇ СЕЛІТРИ

Аміачна селітра – один з основних видів азотних добрив, що містить не менше 34,2 % азоту. Як сировину для одержання гранульованої аміачної селітри використовують неконцентровану 58–60 %-ву азотну кислоту і газоподібний аміак, а як кондиціонувальну домішку – 92,5 %-ву сірчану кислоту, що нейтралізується аміаком разом з азотною кислотою до сульфату амонію. Для обприскування готових гранул застосовують поверхневоактивну речовину – 40%-й водний розчин диспергатора «НФ».

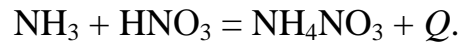
Основні стадії виробництва аміачної селітри – нейтралізація азотної кислоти газоподібним аміаком; одержання висококонцентрованого плаву аміачної селітри; гранулювання плаву; охолодження гранул аміачної селітри; оброблення гранул поверхневоактивною речовиною; очищення повітря і сокової пари перед викидом в атмосферу; пакування та зберігання готового продукту.

Далі розглянуто автоматизацію першої стадії виробництва аміачної селітри – нейтралізації азотної кислоти аміаком, багато в чому визначальної для наступних стадій.

**Технологічна схема процесу.** Азотна кислота підігривається в теплообміннику 1 (рис. 6.1) до температури 70–80 °С соковою парою з нейтралізатора 2; газоподібний аміак підігривається в теплообміннику 3 і далі надходить в апарат 2. Підігріта азотна кислота надходить у змішувач 4, куди подають також сірчану та фосфорну кислоти.

Сірчана кислота дозується з таким розрахунком, щоб уміст сульфату амонію в готовому продукті перебував у межах 0,3–0,7 %. Суміш кислот

надходить далі в нейтралізатор 2, де під тиском, близьким до атмосферного, і за температури 155–165 °С відбувається процес нейтралізації азотної кислоти аміаком:



Азотна кислота й аміак дозуються так, щоб на виході з нейтралізатора 2 розчин мав певний надлишок азотної кислоти (2–5 г/л), необхідний для забезпечення повноти поглинання аміаку в реакційній зоні. У сепараційній зоні апарата 2 сокова пара відокремлюється від киплячого розчину і надходить для очищення в промивну зону апарата, що складається з чотирьох тарілок і бризкоуловлювача. На верхню тарілку подається конденсат сокової пари. На виході з нейтралізатора 2 сокова пара містить 2–5 г/л  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  та 1–2 г/л  $\text{HNO}_3$ ; аміаку за правильного ведення процесу промивання в парах немає.

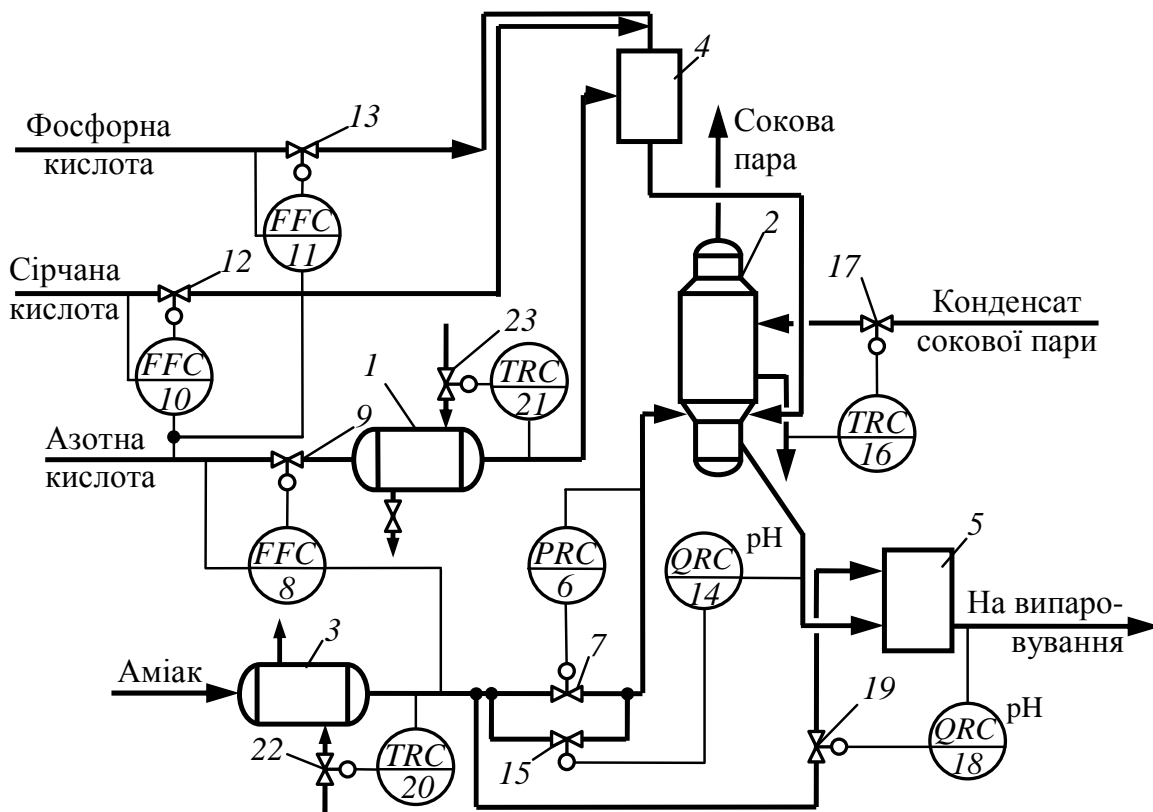


Рис. 6.1. Технологічна схема та схема автоматизації стадії нейтралізації азотної кислоти аміаком:

1, 3 – теплообмінники; 2 – нейтралізатор; 4 – змішувач; 5 – донейтралізатор; 6 – регулятор тиску; 7, 9, 12, 13, 15, 17, 19, 22, 23 – регулювальні клапани; 8, 10, 11 – регулятори співвідношення витрат; 14, 18 – регулятори рН; 16, 20, 21 – регулятори температури

Утворений у нейтралізаторі 92–93%-й розчин аміачної селітри трохи розбавляється розчинами з промивної частини апарата і за концентрації 89–91 % спрямовується в донейтралізатор 5, куди подається аміак для нейтралізації надлишку кислоти і створення лужного середовища розчину

(надлишок аміаку має становити до 0,1 г/л вільного  $\text{NH}_3$ ). Далі розчин аміачної селітри подається до відділення випаровування.

**Автоматизація процесу.** На стадії нейтралізації система автоматичного керування процесом має підтримувати співвідношення потоків аміаку й азотної кислоти в нейтралізаторі, задане значення рН розчину аміачної селітри в ньому, лужну реакцію розчину аміачної селітри після до нейтралізації на вході у випарний апарат. Для системи керування основними є параметри газоподібного аміаку. Щоб уникнути впливу коливань тиску аміаку в зовнішній мережі на якість регулювання процесу нейтралізації, на вході в агрегат аміачної селітри (нейтралізатор 2) автоматично підтримується тиск газоподібного аміаку за допомогою регулятора 6 через вплив на регулювальний клапан 7, який змінює кількість подаваного в апарат аміаку.

Подавання азотної кислоти в нейтралізатор у заданому співвідношенні з витратою аміаку автоматично регулюється регулятором співвідношення витрат 8 зміною ступеня відкривання регулювального клапана 9 на лінії азотної кислоти. Подавання сірчаної та фосфорної кислот автоматично регулюється в заданому співвідношенні з витратою азотної кислоти за допомогою регуляторів співвідношення витрат 10 і 11 та регулювальних клапанів 12 і 13.

Співвідношенням витрат азотної кислоти й аміаку визначається деякий надлишок у продукті нейтралізації кислоти, для контролю і регулювання якого на виході нейтралізатора 2 постійно визначається рН розчину аміачної селітри. Заданий надлишок азотної кислоти в розчині автоматично підтримується регулятором рН 14, що коригує подавання аміаку до нейтралізатора за допомогою регулювального клапана 15, встановленого на байпасній лінії подавання аміаку, якою проходить незначна кількість аміаку (кілька відсотків від загальної витрати). Така система забезпечує хорошу якість регулювання процесу нейтралізації.

Для забезпечення максимально можливого очищення сокової пари в промивній частині нейтралізатора 2 автоматично регулюється подавання конденсату сокової пари на верхню тарілку. Перевищення подавання конденсату небажане, оскільки може призвести до розведення розчинів селітри перед їх випарюванням, а недостатнє подавання конденсату оголить тарілки, позаяк сокова пара перегріта. Подавання конденсату сокової пари регулюють за допомогою регулятора температури 16 впливом на регулювальний клапан 17. Оскільки у випарний апарат для подальшого випаровування не можна подавати кислі розчини аміачної селітри, надлишкова кислотність нейтралізується аміаком у донейтралізаторі 5. Подавання аміаку в нього регулюється за допомогою регулятора 18 рН розчину на виході донейтралізатора, який впливає на регулювальний клапан 19.

Системою автоматичного керування передбачено також регулювання підігрівання аміаку й азотної кислоти регуляторами температури 20 і 21 через вплив на регулювальні клапани 22 і 23 теплоносія, що надходить у теплообмінники 1 і 3.

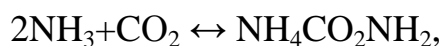


### 6.3. ВИРОБНИЦТВО КАРБАМІДУ

Карбамід – висококонцентроване азотне добриво; порівняно з іншими азотними добривами містить найбільшу кількість азоту. Сировиною для виробництва карбаміду є рідкий аміак і діоксид вуглецю. Процес виробництва карбаміду складається з таких стадій: синтез карбаміду і дистиляція плаву; розпарювання розчинів карбаміду; гранулювання або кристалізація карбаміду; абсорбція газів, що відходять, десорбція аміаку зі стічних вод; упакування і складування готового продукту.

**Технологічна схема процесу синтезу карбаміду.** Діоксид вуглецю турбокомпресором 1, рідкий аміак насосом 2 і розчин карбамату амонію насосом 3 під тиском 23...25 МПа подають у реактор 4 (рис. 6.2). Синтез карбаміду проводять під тиском 23 МПа за температури 180...190 °С.

Реакція синтезу перебігає у дві стадії: спочатку утворюється карбамат амонію за реакцією



а потім відщеплюється вода і виходить карбамід:



Плав з реактора 4 дроселюють до тиску 1,8 МПа і направляють в апарат розкладання середнього тиску 5, де за температури 155...158 °С відбуваються майже повне розкладання карбамату амонію і відгін аміаку та діоксиду вуглецю з розчину. Розчин карбаміду з апарата 5 подається далі в апарат розкладання низького тиску (на схемі не показаний).

Газова фаза з апарата 5, яка містить  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , надходить в абсорбер-промивник 6, де відбувається відмивання аміаку від діоксиду вуглецю матковим розчином. Отриманий розчин карбамату амонію насосом 3 подають у реактор 4. Газова фаза з абсорбера-промивника 6, яка складається переважно з аміаку та інертних газів, потрапляє в конденсатор 7, де аміак конденсується і стікає в резервуар 8 аміаку. З резервуара 8 аміак насосом 2 через підігрівник 9 подають у реактор 4.

**Автоматизація процесу.** Найбільш вигідні умови процесу перетворення аміаку і діоксиду вуглецю в карбамід визначаються глибиною і ступенем перебігу цих реакцій, а також фізичним станом реакційної маси.

Мінімальна температура, за якої доцільно проводити синтез карбаміду, становить 160...170 °С. За більш низьких температур швидкість перетворення карбамату амонію в карбамід досить мала. Практично процес синтезу карбаміду проводять за температури 185...195 °С.

З підвищенням тиску процесу температура розкладання карбамату амонію підвищується. Отже, для проведення синтезу карбаміду за наведених температур слід підтримувати тиск, який перешкоджає розкладанню карбамату амонію. Практично за температури синтезу 185...195 °С такий тиск становить 18...20 МПа.

Велике значення для ефективності процесу синтезу карбаміду має співвідношення вихідних реагентів. За стехіометричного співвідношення аміаку і діоксиду вуглецю рівноважний ступінь їх перетворення (тобто гранично досяжна за тривалого перебування реагентів у реакційній зоні) не перевищує 45...55%. З підвищенням цього співвідношення рівноважний ступінь перетворення аміаку збільшується, однак збільшення надлишку аміаку доцільно лише до визначеної межі. Як показали розрахунки, найбільш економічний надлишок аміаку, що становить 80...100% (від стехіометричного).

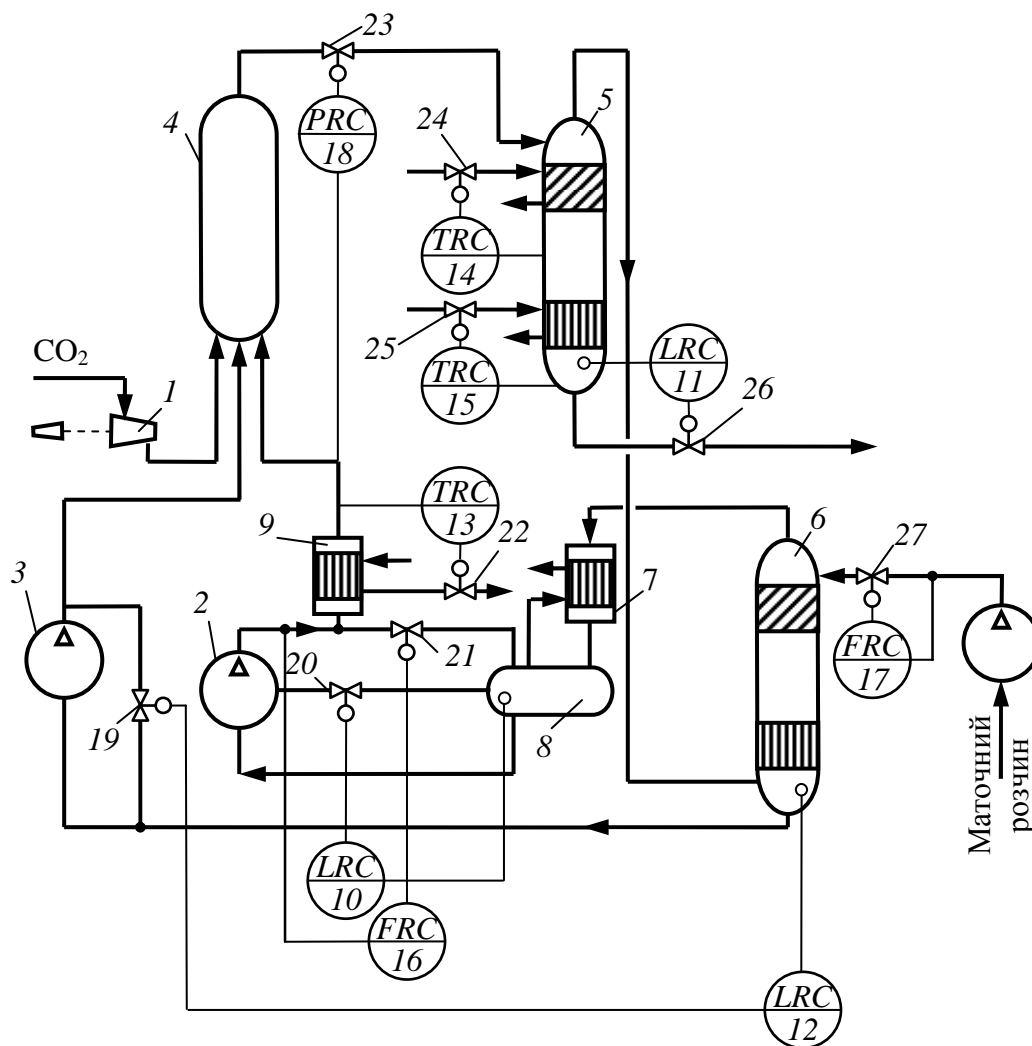


Рис. 6.2. Схема автоматизації процесу синтезу карбаміду:

1 – турбокомпресор; 2, 3 – насоси; 4 – реактор; 5 – апарат розкладання;  
6 – абсорбер-промивач; 7 – конденсатор; 8 – резервуар аміаку; 9 – підігрівник;  
10–12 – регулятори рівня; 13–15 – регулятори температури; 16, 17 – регулятори витрати; 18 – регулятор тиску; 19–27 – регульовальні клапани

Істотний вплив на перебіг процесу синтезу карбаміду має домішок води у вихідних реагентах, вміст якої знижує ступінь перетворення карбамату амонію в карбамід. Застосовувані для синтезу карбаміду технічний аміак і (особливо) діоксид вуглецю містять інертні домішки ( $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ), які негативно впливають на перебіг синтезу карбаміду.

Схема автоматичного регулювання охоплює стабілізацію таких параметрів процесу:

– рівня рідкого аміаку в резервуарі 8 за допомогою регулятора 10 і регулювального клапана 20; рівня в кубі апарата 5 розкладання середнього тиску за допомогою регулятора 11 і регулювального клапана 26 на лінії відбору розчину карбаміду з апарата 5; рівня розчину вуглецевоамонійних солей в абсорбері-промивачі 6 за допомогою регулятора 12 і регулювального клапана 19, встановленого на байпасній лінії насоса 3;

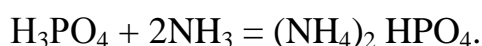
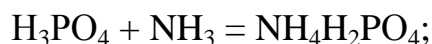
– температури аміаку, що подається в реактор 4, за допомогою регулятора 13 і регулювального клапана 22, встановленого на лінії відведення конденсату пари з підігрівника 9; температури в апараті 5 розкладання за допомогою регуляторів температури 14 і 15 та регулювальних клапанів 24 і 25, встановлених на лініях подачі пари;

– витрати рідкого аміаку, подаваного в реактор 4, за допомогою регулятора витрати 16 і регулювального клапана 21, встановленого на байпасі насоса 2; витрати маточного розчину, подаваного в абсорбер-промивач 6, за допомогою регулятора 17 і регулювального клапана 27; тиску в реакторі 4 за допомогою регулятора тиску 18 і регулювального клапана 23, встановленого на лінії відведення газової фази з реактора 4.

#### 6.4. ВИРОБНИЦТВО ФОСФАТІВ АМОНІЮ

Виробництво складних гранульованих добрив, що містять фосфати амонію (амофосу, діамофосу, нітроамофосу, діамонітрофоски тощо), може бути подане в загальному вигляді трьома основними стадіями: приготування пульпи; сушіння в розпилювальних сушарках з абсорбцією відхідних газів; грануляція та сушіння в барабанних сушарках з абсорбцією відхідних газів, класифікація та кондиціонування. Розглянемо автоматизацію першої з них.

У виробництві амофосу (суміш 95...80 % моно- і 5...20 % діамонійфосфату) пульпу одержують нейтралізацією екстракційної фосфорної кислоти газоподібним аміаком до моно- або діамонійфосфату. Для зрівноважування добрив уводять додаванням аміачної селітри, карбаміду або сульфату амонію. Основні реакції процесу нейтралізації такі:



**Автоматизація приготування пульпи амофосу.** Нейтралізацію фосфорної кислоти аміаком проводять у двох послідовно увімкнених реакторах 1 і 2 (рис. 6.3) до  $\text{pH}_1 \approx 2,5$  і  $\text{pH}_2 \approx 4,5$  за температури 100...105 °С. Температуру в реакторах стабілізують за допомогою регуляторів 5 і 6 впливом на регулювальні клапани 15 і 16 подачі пари на обігрів реакторів.

Витрату фосфорної кислоти, яка подається в реактор 1, вимірюють датчиком 12 і стабілізують регулятором 13 зміною ступеня відкриття регульовального клапана 17 на лінії подачі кислоти. Концентрацію фосфорної кислоти визначають за допомогою датчика густини 11, а витрату фосфорної кислоти з урахуванням її концентрації – блоком множення 14. Системою автоматичного регулювання передбачено регулювання співвідношення витрат фосфорної кислоти й аміаку в кожний з реакторів 1 і 2 за допомогою регуляторів співвідношення витрат 7 і 8 впливом на регульовальні клапани 18 і 19 з корекцією відповідно від регуляторів 3 і 4 рН пульпи на виході першого і другого реактора. Тиск у реакторах 1 і 2 вимірюють за допомогою датчиків тиску 9 і 10.

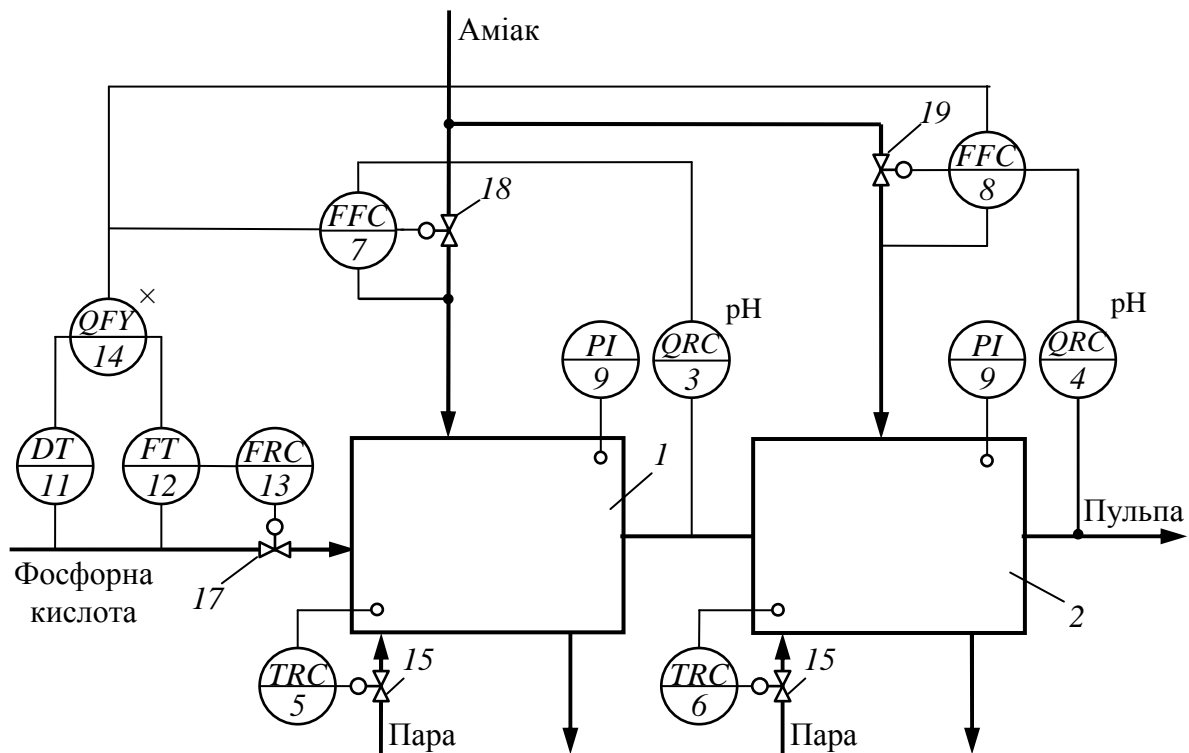


Рис. 6.3. Схема автоматизації виробництва амофосу:  
 1, 2 – реактори; 3, 4 – регулятори рН; 5, 6 – регулятори температури;  
 7, 8 – регулятори співвідношення витрат; 9, 10 – датчики тиску; 11 – датчик густини;  
 12 – датчик витрати; 13 – регулятор витрати; 14 – блок множення;  
 15–19 – регульовальні клапани

## 6.5. ВИРОБНИЦТВО ПОРТЛАНДЦЕМЕНТУ

Портландцемент посідає перше місце серед усіх в'язких речовин за обсягами виробництва і споживання. Його отримують випалюванням до спікання (максимальна температура випалу 1400...1450 °С) точно дозованої суміші глини та карбонату кальцію з наступним тонким подрібнюванням отриманої спеченої маси (клінкеру). Виробництво портландцементу складається з двох самостійних процесів: а) виробництва напівфабрикату-клінке-

ру, що включає підготовку сировинної суміші та її випал; б) розмелювання клінкеру з домішками, складування й пакування портландцементу.

Схему виробництва портландцементу мокрим способом показано на рис. 6.4. Подрібнений у дробарках 2 вапняк подається в трубні сировинні млини, де відбувається загальне (тонке) здрібнювання вапняку і глини, що подається у вигляді рідкої маси глинобовтанки. Із млинів сировинний шлак подається в залізобетонні резервуари з мішалками або у шламбасейни 4 та 5 з пневматичним перемішуванням суміші. У шламових басейнах зберігається і коригується сировинна суміш, тобто змішуються шлами різного хімічного складу для отримання необхідного співвідношення компонентів.

Сировинна суміш обпікається в барабанах обертових печей 6, які опалюються вугільним пилом, газоподібним паливом або мазутом, причому паливо спалюється всередині печі. Сировинний шлам, подаваний у піч з горизонтального шламбасейну 5, рухається протитечею до гарячих топкових газів. При цьому послідовно відбуваються процеси випаровування води, дегідратації мінералів, дисоціації вапняку та реакції між утворюваними оксидом  $\text{CaO}$  і складовими глиняного компонента  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . У зоні спікання за температури  $1450^\circ\text{C}$  остаточно формується цементний клінкер. Отриманий клінкер охолоджується повітрям у колосникових холодильниках до температури  $50\dots 60^\circ\text{C}$ . У цих холодильниках, розміщених під печами, зерна клінкеру рівномірним шаром розподіляються на колосникових ґратах, під які подається повітря, що далі спрямовується в піч для горіння палива.

Із холодильників клінкер подається на склад, де якийсь час вилежується для гашення (гідратації) вільного вапна і зв'язування її гідравлічними домішками. Вилежаний клінкер разом з гідравлічними або інертними домішками та домішкою гіпсу, що регулює терміни схоплювання, розмелюють у кульових цементних млинах 9.

Цемент зберігається в залізобетонних силосах 10 з аерувальними днищами, через які під час розвантаження силосу нагнітається повітря, що розпушує цемент. Цемент споживачеві постачають навалом в авто- чи залізничних цементовозах або у багатошарових паперових мішках.

Для надання цементам певних властивостей, а також для їх здешевлення, застосовують різні домішки до в'язучих речовин: гідравлічні, що містять активний кремнезем, який підвищує водостійкість цементів і сприяє їх твердненню під водою; пластифікувальні поверхневоактивні речовини, що підвищують еластичність і зв'язність цементного тіста; інертні (пісок, вапняк, доломіт), кислотостійкі (андезит, граніт), а також ті, що регулюють терміни схоплювання (гіпс).

Портландцемент виготовляють з порівняно доступної і дешевої сировини; вироби з нього мають високі механічну міцність і морозостійкість. Виробництво портландцементу мокрим способом – складний процес, тому слід постійно контролювати та регулювати параметри технологічного процесу.

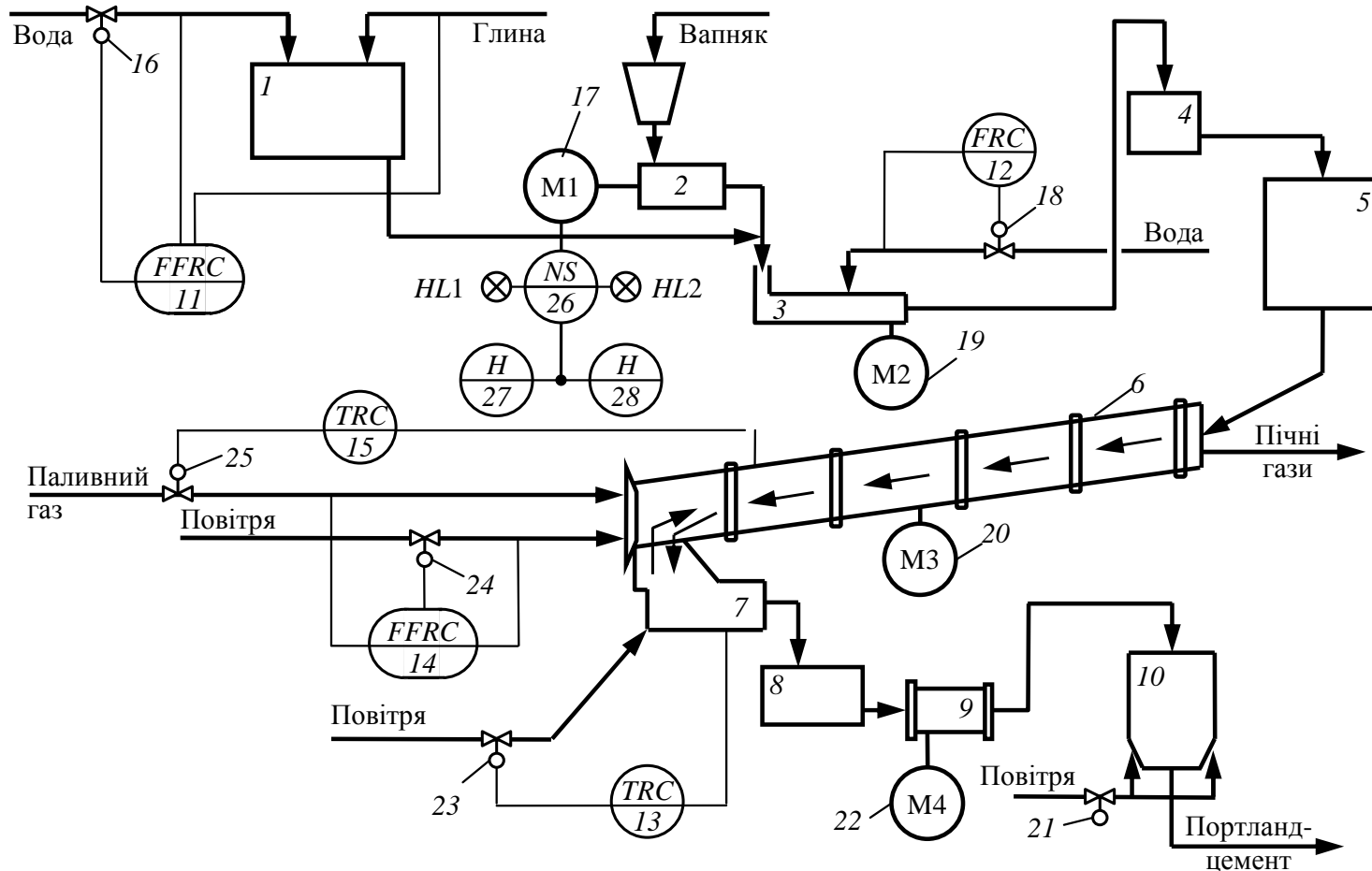


Рис. 6.4. Технологічна схема та схема автоматизації виробництва портландцементу мокрим способом:  
 1 – глинобвтанка; 2 – молоткова дробарка; 3 – сировинний млин; 4 – коригувальні шлам-басейни;  
 5 – горизонтальні шлам-басейни; 6 – барабанна обертова піч; 7 – колосниковий холодильник; 8 – склад;  
 9 – кульовий цементний млин; 10 – цементні силоси; 11, 14 – регулятори співвідношення; 12 – регулятор витрати;  
 13, 15 – регулятори температури; 16, 18, 21, 23, 24, 25 – регулювальні клапани; 17, 19, 20, 22 – електроприводи;  
 26 – магнітний пускач; 27, 28 – кнопкові пости керування; HL1, HL2 – лампочки сигналізації

**Автоматизація процесу виробництва портландцементу мокрим способом.** Приготування водоглиняної суспензії заданої концентрації забезпечується регулятором співвідношення 11 (рис. 6.4) зміною витрати води (відповідно до зміни подавання глини) за допомогою регулювального клапана 16. Витрата води у трубний сировинний млин 3, де відбувається спільне тонке розмелювання подрібненого вапняку та глини, регулюється за допомогою регулятора витрати 12 і регулювального клапана 18 на трубопроводі подавання води.

Температура в обертовій барабанній печі 6 регулюється через зміну подавання палива за допомогою регулятора 15 і регулювального клапана 25. Регулятор співвідношення 14 підтримує на заданому рівні співвідношення *паливо – повітря* зміною подавання в піч повітря клапаном 24.

Стабілізація температури цементного клінкеру на виході колосникового холодильника 7 у межах 60...70 °С забезпечується регулятором 13 зміною ступеня відкривання регулювального клапана 23 на трубопроводі подавання охолоджувального повітря у холодильник. Електродвигун М1, що приводить у дію молоткову дробарку 2, дистанційно керується за допомогою місцевого магнітного пускача 26 та кнопкових постів керування 27 (увімкнення двигуна) і 28 (вимкнення), розміщених на щиті (у разі потреби можна дублювати кнопковими постами керування місцевого розташування). Сигнальні лампочки *HL1* і *HL2* показують стан електродвигуна М1. Аналогічно здійснюється керування (на схемі не показано) роботою електроприводів сировинного млина (електродвигуна М2), барабанної обертової печі (електродвигуна М3) та кульового цементного млина (електродвигуна М4).

## 6.6. ЛАКОФАРБОВЕ ВИРОБНИЦТВО

### 6.6.1. Процес вироблення лакових смол

Лакофарбове покриття зазвичай являє собою полімерну плівку, що утворюється на захищеній поверхні. Для надання покриттю визначених декоративних і захисних властивостей до складу лакофарбового матеріалу, з якого надалі утворюється плівка, перед нанесенням на поверхню вводять частинки пігментів (барвників) і наповнювачів. Плівкоутворювальними для лакофарбових покриттів можуть бути лакові смоли різних типів, серед яких найпоширеніші алкідні. Їх отримують у результаті реакції поліконденсації під час взаємодії спирту і кислоти з утворенням складного ефіру та води. Як кислоти використовують здебільшого природні жирні кислоти, що містяться в рослинних оліях, а як спирти – гліцерин.

Процес вироблення лакових смол реалізується так, щоб в основному апараті можна було синтезувати різні лакові смоли з урахуванням зміни характеристик сировини та кінцевих продуктів. Можливість перебудови режиму синтезу найкраще забезпечується за періодичного ведення процесів у вертикальному реакторі з механічними перемішувальними пристроями.

У таких реакторах досягають достатнього ступеня гомогенізації реакційної суміші та заданого температурного режиму.

Технологічний процес отримання алкідних смол має стадії нагрівання та охолодження. Дослідження перехідного процесу з регулюванням температури в реакторі на різних ділянках температурно-часової програми синтезу алкідної смоли показали, що пропорційно-інтегральний регулятор температури, здатний відповідним налагодженням забезпечити оптимальні показники перехідного процесу лише для однієї ділянки температурно-часової програми. Для підвищення якості регулювання температурного режиму в реакторі потрібно на різних ділянках температурно-часової програми змінювати параметри налагодження регулятора температури. Принципову схему регулювання температурного режиму в реакторі через зміну температури теплоносія за постійної його витрати показано на рис. 6.5.

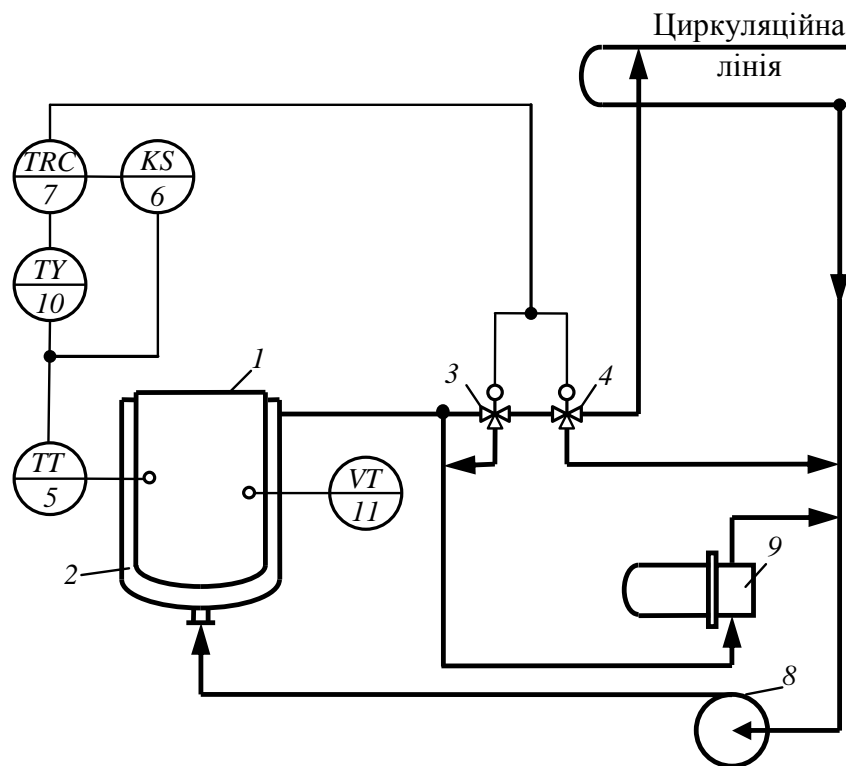


Рис. 6.5. Принципова схема регулювання температурного режиму в реакторі:  
 1 – реактор; 2 – оболонка (сорочка) реактора; 3, 4 – триходові клапани; 5 – датчик температури; 6 – програмний задавач температури; 7 – регулятор температури; 8 – циркуляційний насос; 9 – холодильник; 10 – коригувальний пристрій; 11 – датчик в'язкості

Під час нагрівання вся кількість теплоносія, що проходить через оболонку (сорочку) 2 реактора 1, через клапани 3 і 4 повертається у циркуляційну лінію. Із досягненням визначеної, заздалегідь заданої температури продукту спрацьовує автоматичний регулятор температури 7, який діє на клапан 4, і теплоносій через цей клапан насосом 8 повертається в реактор. Якщо потрібно охолоджувати продукт, регулятор 7 впливає на клапани 3 та 4, і частина теплоносія



спрямовується через холодильник 9. Кількість теплоносія, що проходить через холодильник, залежить від величини відхилення поточного значення температури в реакторі від її заданого значення.

Коригувальний пристрій 10 за сигналом від датчика температури 5 видає на регулятор 7 сигнал, пропорційний заздалегідь розрахованим залежностям налагоджень регулятора від температури в реакторі. Отримуючи сигнал від програмного задавача 6, регулятор 7 з урахуванням скоригованих налаштувань впливає на триходові клапани 3 та 4, змінюючи температуру теплоносія на вході в сорочку 2 реактора, щоб забезпечити потрібну температуру реакційної маси.

Можливі й інші варіанти системи автоматичного регулювання (САР) температурно-часовою програмою, наприклад каскадна схема, у якій до регулятора температури реакційної маси може бути додано регулятор температури теплоносія в сорочці реактора, який отримуватиме завдання від основного контура регулювання.

Процес поліконденсації під час синтезу алкідних смол контролюють за зміною в'язкості реакційної маси, вимірюваної датчиком 11, оскільки на стадії поліконденсації доведення молекулярної маси смоли до заданої визначається в'язкістю смоли на цій стадії.

### **6.6.2. Процес вироблення пігментованих лакофарбових емалей**

Емалі являють собою дрібнодисперсні суспензії пігментів у плівкоутворювальному компоненті. Зазвичай неорганічні пігменти забезпечують захисні та декоративні властивості лакофарбового покриття, а органічні – колір. Основний технологічний процес отримання емалей – диспергування пігментів у плівкоутворювальному компоненті. В існуючих технологічних схемах виробництва емалей використовують диспергувальне устаткування з вільнорухомими розмелювальними тілами, що приводяться в рух мішалками, розміщеними на вертикальній осі відповідного апарата. Найчастіше в технологічних процесах отримання емалей як диспергувальне устаткування використовують бісерні млини.

Дослідження процесу отримання емалей показали, що в'язкість суспензії залежить від об'ємної концентрації пігменту в системі, яка включає пігмент і лакову смолу (плівкоутворювальний компонент), тому в'язкість суспензії можна використовувати для контролю співвідношення пігменту і плівкоутворювального компонента. Пігментовані лакофарбові покриття повинні мати не тільки захисні, але й декоративні властивості, тому колірні й оптичні характеристики – один з головних параметрів контролю в процесі вироблення як однопігментних, так і багатопігментних емалей. На оптичні параметри пігментованих систем істотно впливають розміри пігментних частинок. З огляду на це використовують непрямі методи контролю розмірів частинок у пігментованих лакофарбових системах, що ґрунтуються на взаємозв'язку між оптичними або колірними характеристиками пігментованої лакової системи і діаметром пігментних частинок.

Схему контролю та регулювання процесу диспергування пігментних суспензій для вироблення емалей показано на рис. 6.6. Рідка сировина (плівкоутворювальна) зі сховища 1 і пігмент з бункера 2 завантажуються дозаторами 3 та 4 у змішувачі-дисольвери 5. Пігментна паста («заміс») після дисольверів 5 насосом 6 спрямовується для диспергування на два послідовно працюючі бісерні млини 7 і 8. Виходячи з виявлених взаємозв'язків між дисперсністю частинок і фізико-хімічними та колірними характеристиками пігментних суспензій, основними контрольованими параметрами обрано в'язкість і коефіцієнти відбиття пігментних суспензій.

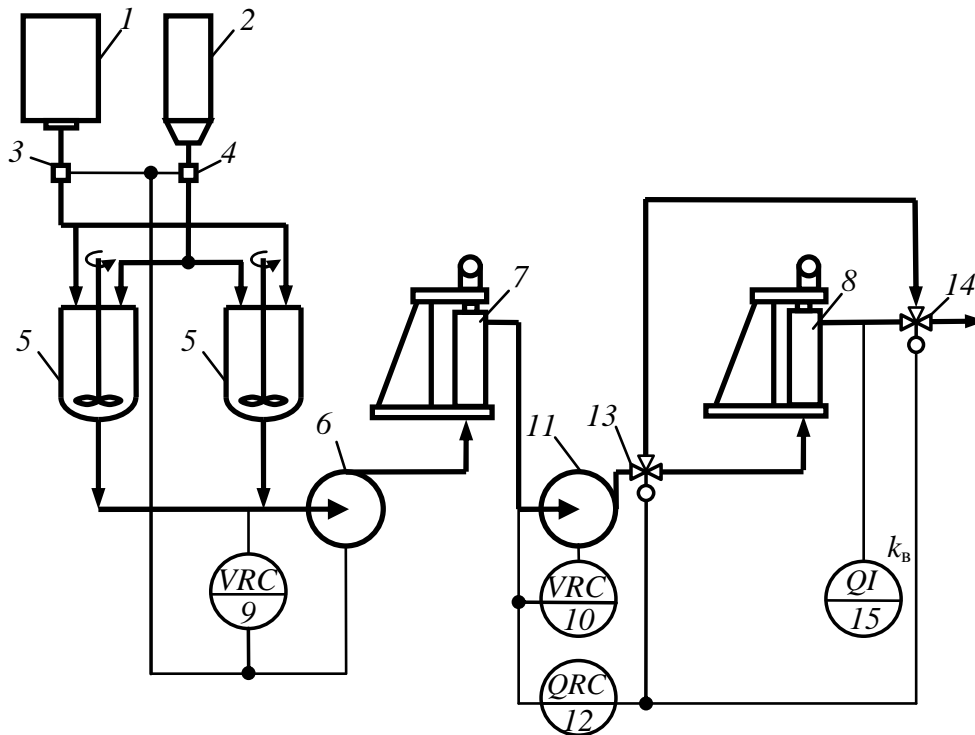


Рис. 6.6. Схема контролю і регулювання процесу диспергування пігментованих лакофарбових систем: 1 – сховище; 2 – бункер; 3, 4 – дозатори; 5 – змішувачі-дисольвери; 6, 11 – насоси; 7, 8 – бісерні млини; 9, 10 – регулятори в'язкості; 12 – регулятор коефіцієнта відбиття; 13, 14 – триходові клапани; 15 – датчик коефіцієнта відбиття

Робота системи автоматичного керування багато в чому визначається тим, чи виробляється відразу кольорова емаль (тобто, чи відбувається в дисольвері змішування всіх пігментів, що входять у цю кольорову емаль, з наступним диспергуванням багатопігментної суспензії в бісерних млинах), чи виробляється однопігментна емаль (тобто в дисольвер надходить один пігмент, а на бісерні млини – однопігментна суспензія).

У першому випадку завантаженню пігментів у змішувач мають передувати розрахунок рецептури пігментної частини за допомогою ЕОМ і автоматичне керування дозаторами пігментів, що надходять у дисольвери. Плівкоутворювальний компонент через відповідний дозатор подається відповідно до заданого значення об'ємної концентрації пігментів.

У процесі виробництва однопігментних емалей відповідно до обраної об'ємної концентрації пігментів визначається подання як плівкоутворювального компонента, так і пігменту; в цьому разі відпадає потреба розраховувати рецептуру суміші. Обране співвідношення між пігментом і смолою підтримується залежно від значення в'язкості пігментної пасти після дисольвера 5. Відповідно до нього регулятор 9 змінює завдання дозаторам 3 і 4, а також формує випереджувальний імпульс на насос 6 для керування подаванням пігментної пасти в перший бісерний млин 7, оскільки зміна об'ємної концентрації пігменту в пасті після дисольверів призведе до порушення фактичного співвідношення обсягів розмелювальних тіл і пігментних частинок у бісерному млині, а отже, до зміни розмірів пігментних частинок на виході млина.

Подавання продукту з першого бісерного млина 7 у другий 8 змінюється за значенням в'язкості продукту на виході млина 7, залежно від якого регулятор 10 впливає на подачу насоса 11. Зміну розмірів частинок на виході млина 7 контролюють за коефіцієнтом відображення пігментної суспензії, регулювання якого виконує регулятор 12 за допомогою триходових клапанів 13 і 14, які визначають напрямок руху пігментної суспензії: на фільтрування і фасування або на другий бісерний млин 8.

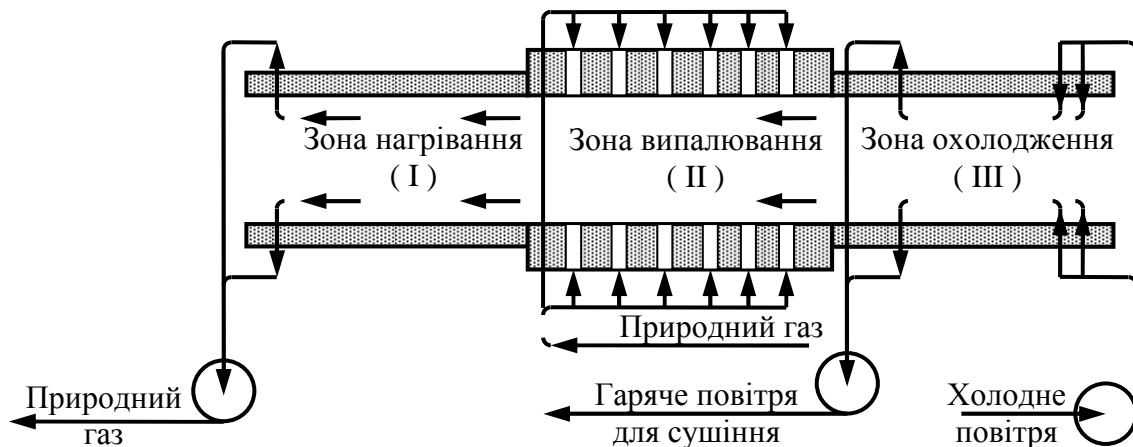
Включення до технологічної схеми другого бісерного млина зумовлено потребою в усуненні виникнення на виході першого млина істотних відхилень розмірів пігментних частинок від заданих. У цьому разі триходові клапани 13 і 14 забезпечують надходження пігментної суспензії на повторне диспергування в другому млині з додатковим контролем коефіцієнта відбиття пігментованої системи за допомогою датчика 15.

## **6.7. ПРОЦЕС ВИПАЛЮВАННЯ КЕРАМІЧНОЇ ЦЕГЛИ**

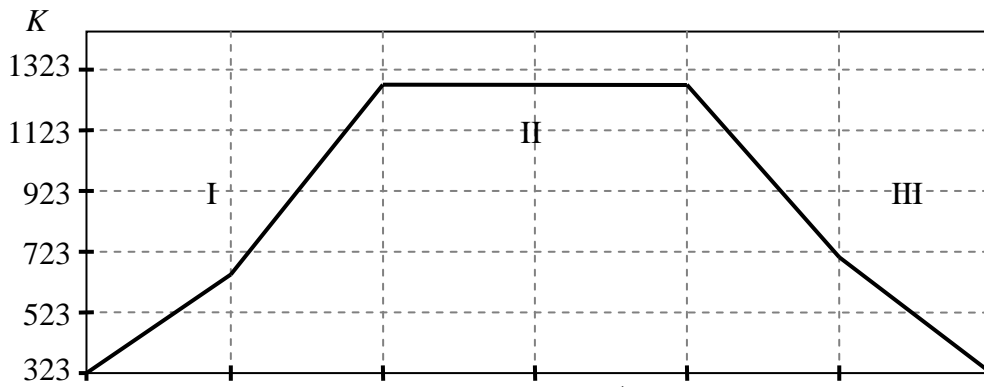
На більшості світових виробництв керамічної цегли основними випалювальними агрегатами є тунельні печі. Попри певні відмінності в конструкції, всі вони мають однаковий принцип роботи.

Тунельна піч являє собою теплову установку безперервної дії, в якій садка виробів (викладена на вагонетці попередньо підсушена цегла-сирець) пересувається довгим прямолінійним випалювальним каналом назустріч теплоносію. Рух виробів уздовж печі відбувається за рахунок проштовхування до випалювального каналу нової вагонетки через певний час, який називається ритмом проштовхування. На вході та виході піч обладнана механічними шторами для усунення підсмоктування повітря у випалювальний канал. Між вхідною шторою та зоною нагрівання розміщено форкамеру довжиною в одну вагонетку – для запобігання порушенню температурного режиму печі під час заштовхування нових виробів. Вагонетку спочатку заштовхують до форкамери, у цьому разі штора між нею і зоною нагрівання опущена. Після зачинення вхідного отвору, вихідну штору форкамери піднімають і проштовхують вагонетку вже безпосередньо до пічного каналу.

Тунельна піч умовно поділяється на три зони (рис. 6.7, *a*): нагрівання, випалювання та охолодження. Зона нагрівання призначена для остаточного висушування виробів та нагрівання їх до температури газового середовища зони випалювання. Зона нагрівання складається з трьох ділянок. На першій, розташованій після форкамери, починається сушіння сирцю на щойно введених пічних вагонетках теплом відпрацьованих димових газів, які вже пройшли інші ділянки цієї зони. На другій ділянці по обидва боки пічного каналу розташовано отвори для виведення з печі димових газів. На третій – відбувається нагрівання виробів димовими газами та продуктами спалювання палива, що надходять із зони випалювання.



*a*



*b*

Рис. 6.7. Тунельна піч: *a* – схема; *b* – температурна крива випалювання

Дотримання певного температурного поля у кожній зоні печі – найважливіша умова отримання якісної продукції (рис. 6.7, *b*) [8]. Для кращого прогріву садки виробів на початку зони нагрівання передбачено контури рециркуляції. До пальникових груп у зоні випалювання надходить природний газ та повітря з навколишнього середовища. Для спалювання газу встановлено імпульсно-реактивні пальники. Газово-повітряна суміш з великою швидкістю під тиском виштовхується поміж пакети садки. Для повного спалювання суміші температура у каналі печі має дорівнювати температурі її спалювання. Для створення окиснювального середовища з метою інтенсифікації прохо-

дження реакцій у глинистій сировині через окиснювальні групи до каналу печі надходить повітря, відібране із зони охолодження.

Для поділу зони випалювання та охолодження передбачено встановлення повітряної завіси, яка інтенсифікує охолодження виробів і перешкоджає прориву більш холодного повітря в зону випалювання через зазори між склепінням і садкою, запобігаючи недопалу периферійних рядів садки. В зоні нагрівання підтримується високий рівень розрідження, що виключає можливість вибивання газів, які виходять з печі. На початку зони встановлено вентилятор для відбору повітря з підвагонеточного простору, що забезпечує вирівнювання аеродинамічних режимів між ним та випалювальним каналом. Подавання повітря із зовнішнього середовища у підвагонетковий простір і міжсклепіння відбувається за допомогою вентиляторів, розташованих в кінці зони охолодження.

**Автоматизація процесу** випалювання цегли в тунельній печі. Відповідно до запроваджених алгоритмів керування деякі складові системи керування можуть працювати без взаємодії з її верхнім рівнем. До них належать системи регулювання співвідношення витрат первинного повітря і природного газу, розрідження (тиску) в печі, концентрації CO і CO<sub>2</sub> у димових газах, концентрації O<sub>2</sub> газового середовища в районі окиснювальних груп, перепаду тиску між зонами випалювання й охолодження, блокування подавання природного газу та первинного повітря під час проштовхування пічного вагона.

Системи автоматичного регулювання керувальних змінних мають безпосередній зв'язок із верхнім рівнем системи – розраховані нею оптимальні значення надходять як уставки (завдання) регуляторам цих САР. До них належать САР оптимального температурного поля печі.

Спрощену схему системи керування процесом випалювання цегли наведено на рис. 6.8 [8]<sup>21</sup>. Для стабілізації заданого співвідношення витрат первинного повітря та природного газу сигнали від вимірювачів 7а, 8а надходять до відповідних перетворювачів 7б, 8б, а звідти – на регулятор співвідношення витрат 8в. До нього ж надходить коригувальний сигнал від датчика концентрації CO та CO<sub>2</sub> (складається з первинного вимірювального перетворювача (ПВП) 4а та проміжного перетворювача 4б, що забезпечує формування стандартного вихідного сигналу – з таких самих складових побудовані й решта датчиків схеми) у димових газах, які викидаються в атмосферу. Керувальний сигнал від регулятора 8в надходить до виконавчого механізму 8г. Описаний контур регулювання є на кожній з тих пальникових груп зони випалювання, де немає потреби дотримуватись відновлювального середовища.

---

<sup>21</sup> На відміну від решти наведених схем автоматизації, виконаних спрощеним способом, ця схема наводиться як приклад побудови схеми автоматизації розгорненим способом відповідно до ДСТУ Б А.2.4-3:2009, але без виділення прямокутників «Прилади місцеві» та «Прилади на щиті (пульті) керування», позаяк система керування дворівнева (прим. авт.).

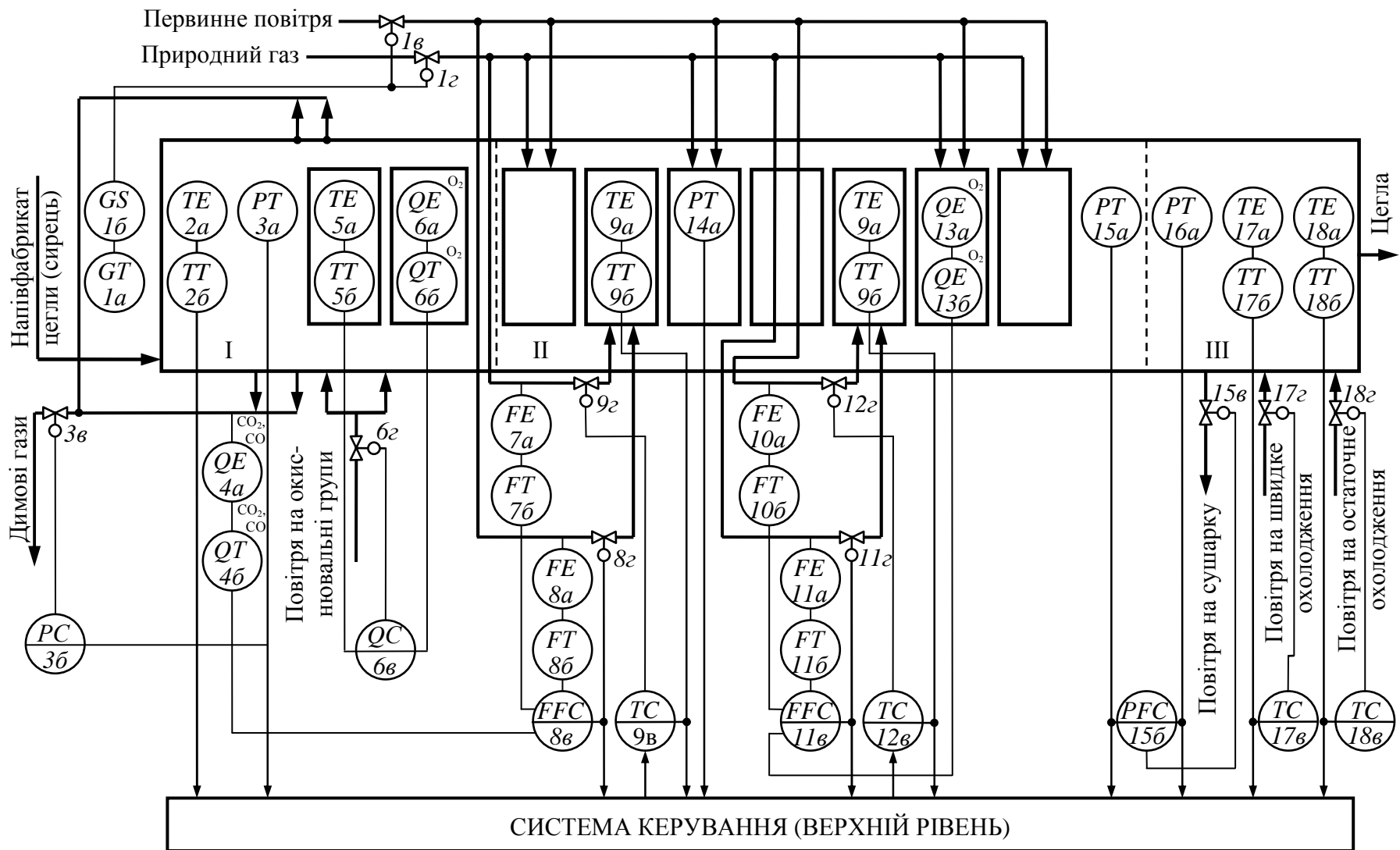


Рис. 6.8. Схема автоматизації процесу випалювання керамічної цегли в тунельній печі

Решта палинкових груп має аналогічні контури, що складаються з ПВП витрати *10a* та *11a*, проміжних перетворювачів витрати *10б* та *11б*, регулятора співвідношення витрат *10в* та виконавчого механізму *11г*. Відмінність цих контурів регулювання полягає у тому, що коригування співвідношення витрат здійснюється за значенням концентрацій кисню на даних позиціях зони випалювання, яка вимірюється датчиком концентрації *13a*, *13б*.

Регулювання температури здійснюється на кожній палинковій групі зони випалювання, зонах швидкого та остаточного охолодження. Контури регулювання температури по всій зоні випалювання однотипні. Вони складаються з ПВП температури *9a* та *12a*, проміжних перетворювачів *9б* та *12б*, регуляторів *9в* та *12в* і виконавчих механізмів *9г* та *12г*, встановлених на газопроводах палинкових груп. До складу АСР температури в зоні охолодження входять датчики *17a*, *17б* та *18a*, *18б*, регулятори *17в* та *18в* і виконавчі механізми *17г* та *18г* на трубопроводах, якими до зони подається повітря на швидке та остаточне охолодження відповідно. Визначення виду середовища на окиснювальних групах проводиться датчиком *6a*, *6б*. До АСР концентрації  $O_2$  входять також регулятор *6в* та виконавчий механізм *6г*.

Для запобігання порушенню температурного режиму на позиціях окиснювальних груп виміряне датчиком *5a*, *5б* значення температури надходить до регулятора *6в* як коригувальне.

Стабілізація нульового тиску на границі зон випалювання і охолодження проводиться АСР, яка включає: датчики тиску *15a* та *16a*, регулятор співвідношення тисків *15б* та виконавчий механізм *15в*, встановлений на трубопроводі повітря, яке відбирається на сушарку. Регулювання розрідження в зоні нагрівання здійснюється за рахунок витрати димових газів, які викидаються в атмосферу. Розрідження вимірюється датчиком *3a*, сигнал з якого надходить до регулятора *3б*, що керує положенням заслінки *3в* на димотягу. Чергове проштовхування пічної вагонетки фіксується датчиком руху *1a*, який направляє сигнал на контактний пристрій *1б*, а той – на виконавчі механізми *1в*, *1г*, блокуючи подавання газу та повітря на палинкові групи. Його мета – запобігання потраплянню полум'я на садку виробів під час руху вагонеток. Сигнали про температуру (датчик *2a*, *2б*) та розрідження (датчик *14a*) надходять до керувальної ЕОМ, пов'язаної з базою даних технологічного режиму верхнього рівня системи (інформація про температуру та розрідження чи тиск знімається з кожної позиції печі).

## **6.8. ВИРОБНИЦТВО СІРЧАНОЇ КИСЛОТИ КОНТАКТНИМ СПОСОБОМ**

Сірчана кислота – один з основних продуктів хімічної промисловості. Вона застосовується в різних галузях промисловості: виробництві мінеральних добрив, штучних волокон, органічних барвників, капролактаму й інших продуктів.

Сировина для виробництва сірчаної кислоти – елементна сірка або речовини, які містять сірку і з яких може бути виділено елементну сірку чи отримано діоксид сірки  $\text{SO}_2$ , що є вихідною речовиною для отримання  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , утворюється в результаті спалювання сірки або сірчаного колчедану. Переробка  $\text{SO}_2$  у сірчану кислоту включає окиснювання його до  $\text{SO}_3$  з наступною гідратацією. Швидкість взаємодії діоксиду сірки з киснем за звичайних умов дуже мала, тому в промисловості цю реакцію проводять на каталізаторі (контактний метод виробництва сірчаної кислоти).

Технологічний процес за контактного способу з використанням колчедану як сировини включає чотири основні стадії: випал колчедану для отримання діоксиду сірки (сірчистого газу), очищення сірчистого газу від домішок, окиснювання діоксиду сірки на каталізаторі й абсорбцію сірчаного ангідриду. Далі розглянуто автоматизацію стадій випалу колчедану та контактного окиснювання.

### **6.8.1. Процес випалювання колчедану в киплячому (псевдозрідженому) шарі**

За цим методом здрібнений колчедан спалюють у висхідному повітряно-газовому потоці. Повітря подається в піч знизу через горизонтальні розподільні ґрати з такою швидкістю, за якої рух частинок колчедану та недогарка нагадує киплячу рідину. Швидкість горіння колчедану в киплячому шарі висока: для повного вигорання частинок флотаційного колчедану досить 6...7 с. Під час випалювання колчедану виділяється велика кількість теплоти – температура в киплячому шарі може підвищуватись до 1100...1200 °С.

Така висока температура може спричинити спікання недогарка, тому процес випалу ведуть за температури 750...800 °С, знижуючи температуру горіння за допомогою трубчастих тепловіднімальних елементів, занурених у киплячий шар. Усередині цих елементів циркулюють вода та пароводяна емульсія. Газовим потоком з киплячого шару виноситься значна кількість завантажуваних із колчеданом дрібних частинок, які догорають у надшаровому просторі, що призводить до підвищення температури випалювальних газів на виході з печі до 870...930 °С. Для максимального використання надлишкової теплоти процесу випалювальні газу охолоджують у котлі-утилізаторі до 500...550 °С. Схему установки печі з киплячим шаром наведено на рис. 6.9.

Вологий колчедан подають у піч 1 за допомогою тарілчастого живильника 2. Колчедан подається в піч по похилій площині, розміщеній у форкамері 3 печі 1, і надходить у нижню зону киплячого шару. Повітря, подаване у піч вентилятором 4, поділяється на три потоки: до колосників форкамери, до основного поду печі (первинне повітря) й у фурми<sup>22</sup> над киплячим шаром

---

<sup>22</sup> Фурма – пристрій для подавання повітряного дуття в металургійні печі.



(вторинне повітря). Швидкість первинного повітря має бути такою, щоб забезпечити «кипіння» шару колчедану та недогарка. До колосників форкамери подається більш інтенсивне дуття, ніж до основного поду.

Випалювальний газ із печі проходить у котел-утилізатор 5, циклони 6, електрофільтр 7 і потім вентилятором 8 направляється на переробку. Продуктивність печі киплячого шару становить 120...170 т/доб колчедану, а вироблення пари на 1 т спалюваного колчедану – 1200 кг. Вміст діоксиду сірки в пічному газі становить 13...14 %, а сірки в недогарку – 1,2...1,3 %.

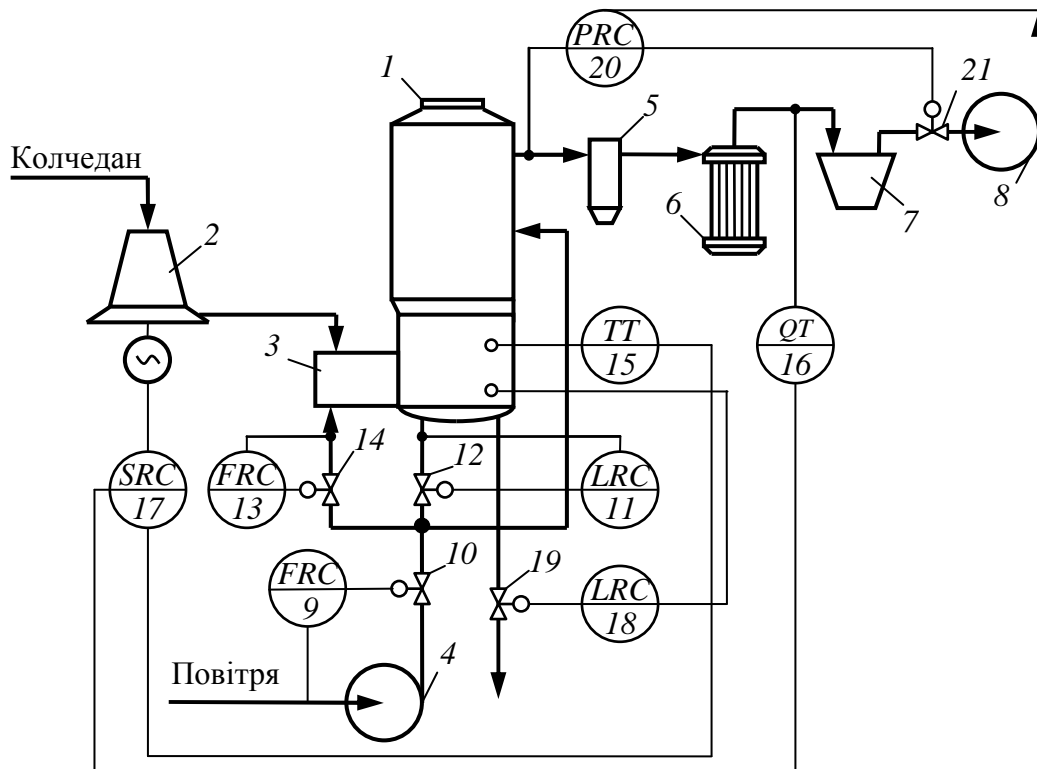


Рис. 6.9. Технологічна схема і схема автоматизації установки випалу колчедану в печі з киплячим шаром: 1 – піч; 2 – живильник; 3 – форкамера печі; 4, 8 – вентилятори; 5 – котел-утилізатор; 6 – циклони; 7 – електрофільтр; 9, 11, 13 – регулятори витрати; 10, 12, 14, 21 – дросельні заслінки; 15 – датчик температури; 16 – датчик концентрації; 17 – регулятор кількості обертів; 18 – регулятор рівня; 19 – дисковий затвор; 20 – регулятор розрідження

**Автоматизація процесу.** Дослідження процесу випалу в печах з киплячим шаром показали, що подачу колчедану в піч можна здійснювати як за концентрацією  $\text{SO}_2$  у випалювальному газі, так і за температурою киплячого шару. Регулювання навантаження за температурою може призвести (у разі максимальних збурювань з боку сірки та вмісту вологи в колчедані) до зміни концентрації газу на  $\pm 1\%$   $\text{SO}_2$  (нормальна концентрація  $12\%$   $\text{SO}_2$ ). Якщо ж регулювати навантаження за концентрацією сірчистого газу, то коливання температури киплячого шару можуть бути  $\pm 40\text{ }^\circ\text{C}$  (нормальна температура  $750\text{ }^\circ\text{C}$ ). Оскільки для виробництва сірчаної кислоти коли-

вання концентрації  $\text{SO}_2$  у випалювальному газі на  $\pm 1\%$  неприпустиме, то регулювання подачі колчедану доцільно вести за концентрацією  $\text{SO}_2$ . За такого регулювання датчиком є електричний газоаналізатор на  $\text{SO}_2$ , інерція якого обмежує швидкодію системи регулювання концентрації газу. З огляду на це поряд із регулюванням подачі колчедану за концентрацією газу застосовують також каскадне регулювання подачі колчедану за температурою киплячого шару та концентрацією  $\text{SO}_2$  у газі.

Важлива умова нормального перебігу процесу випалу в печі – підтримання постійної висоти киплячого шару. Контроль висоти киплячого шару здійснюють вимірюванням непрямого параметра – тиску первинного дуття під ґратами печі. За стабілізованої витрати повітря під ґрати між рівнем киплячого шару і тиском дуття встановлюється однозначна залежність. Постійна висота киплячого шару регулюється випуском недогарка з печі дисковим затвором.

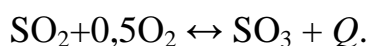
Схемою автоматизації печі передбачено такі системи регулювання:

– *автоматична стабілізація* заданої витрати повітря на вході повітродувки 4 за допомогою регулятора витрати 9 і дросельної заслінки 10; автоматична стабілізація подачі первинного повітря, що надходить під ґрати печі, за допомогою регулятора витрати 11 і дросельної заслінки 12; автоматична стабілізація витрати повітря у форкамеру за допомогою регулятора витрати 13 і дросельної заслінки 14;

– *автоматичне регулювання* подачі колчедану в піч залежно від температури киплячого шару, вимірюваної датчиком 15, з корекцією за концентрацією газу перед електрофільтром, вимірюваною датчиком 16 – подача колчедану регулюється регулятором 17 зміною кількості обертів електродвигуна тарілчастого живильника 2; автоматичне регулювання висоти псевдозрідженого шару в печі за допомогою регулятора 18 і дискового затвора 19; автоматичне регулювання розрідження у верхній частині печі за допомогою регулятора 20, який впливає на дросельну заслінку 21 перед вентилятором 8.

### 6.8.2. Процес контактного окиснювання діоксиду сірки

У виробництві сірчаної кислоти контактним методом окиснювання  $\text{SO}_2$  здійснюється з каталізатором за реакцією



Для цього газ приводять у контакт із каталізатором, що перебуває в стаціонарному або псевдозрідженому стані. Кількість окисненого  $\text{SO}_2$  виражають або в частках загального вмісту діоксиду сірки в газі, або у відсотках до загальної первісної кількості  $\text{SO}_2$  у газі. Цю величину називають ступенем перетворення або ступенем окиснювання. Ступінь перетворення  $\text{SO}_2$ , якого досягають на каталізаторі, залежить від його активності, складу газу, тривалості контакту газу з каталізатором, тиску, температури тощо.

Для газу такого складу теоретично можлива, тобто рівноважна, ступінь перетворення ( $X_p$ ) виражається рівнянням

$$X_p = P_{\text{SO}_3} / (P_{\text{SO}_2} + P_{\text{SO}_3}),$$

де  $P_{\text{SO}_3}$  і  $P_{\text{SO}_2}$  – рівноважні парціальні тиски  $\text{SO}_3$  і  $\text{SO}_2$ .

Зі збільшенням ступеня перетворення зменшується вміст  $\text{SO}_2$  у відхідних газах. Так, за  $X = 0,995$  у відхідних газах міститься близько 0,04 %  $\text{SO}_2$ . Для здійснення процесу окиснювання  $\text{SO}_2$  застосовують різні контактні апарати (реактори). Останніми роками переважного розвитку набули багатошарові контактні апарати з проміжним охолодженням (теплообміном), що вирізняються простотою, можливістю використання тепла реакції, малим гідравлічним опором. Теплообмінники розміщені усередині контактної апарата або поза ним (виносні). Процес окиснювання  $\text{SO}_2$  полягає в тому, що газ, підігрітий до температури, трохи вищої від температури запалювання (400...420 °C), пропускають через перший шар контактної маси, де відбувається окиснювання 60...80 % від усієї кількості  $\text{SO}_2$ . Температура газу підвищується до 550...580 °C за рахунок виділення тепла реакції. Газ після першого шару охолоджують до 460...480 °C в теплообміннику або додаванням більш холодного газу. Після охолодження газ надходить у другий шар контактної маси, де відбувається подальше окиснювання  $\text{SO}_2$ . У цьому разі температура знову підвищується, газ знову потрібно проохолоджувати і так далі. Температурні умови процесу тим ближчі до оптимальних, чим більше шарів у контактної маси. У промисловості використовують контактні апарати, що мають від трьох до п'яти шарів контактної маси.

**Автоматизація процесу.** Один з основних шляхів інтенсифікації виробництва сірчаної кислоти – підвищення початкової концентрації діоксиду сірки в перероблюваних газах перед контактним апаратом. У разі концентрації діоксиду сірки близько 10,5 % рівноваги на виході з першого шару досягають за температури вище 600 °C. Однак у цьому разі виникає ризик перегрівання каталізатора і зниження його активності.

Розглянемо основні фактори, що впливають на режим роботи контактної апарата. Температура в шарі каталізатора залежить від кількості та концентрації діоксиду сірки у випалювальному газі, а також від його температури. Найбільший вплив на температуру в контактному апараті має концентрація діоксиду сірки у випалювальному газі: що більше виділяється тепла в результаті реакції окиснювання діоксиду сірки в триоксид, то вища температура. Вплив зміни витрати випалювального газу на температуру на виході із шару каталізатора і ступінь конверсії майже непомітний, але дуже змінюється температура усередині шару, що вимірюється на 1/4–1/5 його висоти (швидкість зміни температури на цій відстані від входу в шар має найбільше значення).

Щоб зменшити втрати сірки, стабілізують ступінь конверсії в перехідних режимах компенсацією збурювань, зумовлених зміною концентрації діоксиду сірки та витрати газу в контактний апарат. Для забезпечення

стабільної роботи контактної апарату в різних режимах застосовують комбіновану систему регулювання (рис. 6.10).

Замір температур здійснюють у трьох точках: на вході в контактний шар, усередині шару і на виході з нього. З виникненням збурення на вході в шар сигнал від датчика температури в шарі надходить у ведений регулятор 4, де порівнюються показання датчика і задавача, зв'язаного з головним регулятором 3, і виробляється сигнал на регулювальний клапан 6 через схему стабілізації температури на вході в шар за допомогою регулятора 5.

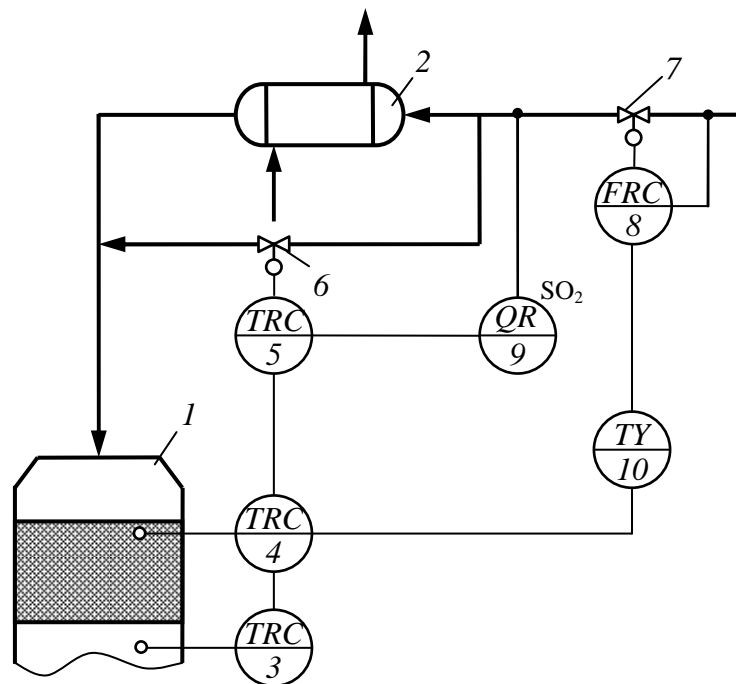


Рис. 6.10. Комбінована система регулювання режиму роботи контактної апарату:  
 1 – контактний апарат; 2 – теплообмінник; 3–5 – регулятори температури;  
 6, 7 – регулювальні клапани; 8 – регулятор витрати; 9 – датчик концентрації діоксиду сірки; 10 – обчислювальний блок

Відповідно змінюються витрата холодного газу, підтримувана регулятором 5, і температура на вході в контактний апарат. Це приводить до попередньої компенсації збурення. Якщо температура на виході контактної апарату відхилиться від заданого значення, то головний регулятор 3 усуне цю зміну. Введення корекції від датчика 9 концентрації діоксиду сірки у випалювальний газ в контур стабілізації температури на вході контактної апарату (на регулятор 5) дає змогу компенсувати вплив зміни концентрації діоксиду сірки. Для забезпечення інваріантності температур газу на вході і виході контактної апарату від витрати газу обчислювальний блок 10 формує сигнал, що відповідає за формою і тривалістю вимірній температурі усередині шару каталізатора, але протилежний за знаком.

Така система регулювання забезпечує за значних коливань складу та навантаження випалювального газу збільшення загального ступеня контактування на 0,1...0,2 %.

## 6.9. ПРОЦЕСИ КОНВЕРСІЇ МЕТАНУ У ВИРОБНИЦТВІ АМІАКУ

Сировиною для отримання продуктів азотної промисловості є атмосферне повітря та різні види палива. Перший етап виробництва синтетичного аміаку – отримання синтез-газу конверсією природного газу. Синтез-газ являє собою суміш монооксиду вуглецю та водню. На другому етапі відбувається конверсія монооксиду вуглецю та відокремлення сполук вуглецю, унаслідок чого отримують азотоводневу суміш (АВС), яка і є сировиною для безпосереднього синтезу аміаку.

Процес конверсії метану – двостадійний. Перша стадія – пароводяна конверсія метану у трубчастих печах з неповним перетворенням метану, друга – конверсія метану киснем повітря у шахтному реакторі. При цьому кисень повітря служить окиснювачем метану, азот же входить до складу АВС.

Процеси конверсії метану водяною парою та киснем проходять з різними тепловими ефектами: реакції парової конверсії ендотермічні, а реакції кисневої конверсії – екзотермічні. Зокрема, теплоти реакції окиснення метану киснем достатньо не лише для автотермічної власне кисневої конверсії, але й для покриття витрат тепла на ендотермічні реакції парової конверсії, тому конверсію метану слід проводити сумішшю окиснювачів.

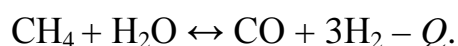
Швидкість взаємодії метану з водяною парою без каталізатора надзвичайно мала. Найбільшу каталітичну активність у цьому процесі мають нікелеві каталізатори на глиноземі (носії). Нікелеві каталізатори виробляють у вигляді таблетованих або екструдованих кілець Рашига. Активність нікелевих каталізаторів знижується під впливом каталітичних отрут, особливо – під впливом сполук сірки. З огляду на це природний газ перед конверсією має бути ретельно очищений від органічних сполук сірки та сірководню.

Розглянемо автоматизацію процесів конверсії метану.

### 6.9.1. Процес парової каталітичної конверсії метану в трубчастій печі

Технологічну схему та схему автоматизації процесу конверсії метану в трубчастій печі показано на рис. 6.11. Природний газ із заводського колектора під тиском 1,2 МПа змішується в співвідношенні 10 : 1 з АВС, яка надходить з відділення синтезу аміаку і спрямовується далі в трубчасту піч 1, де суміш газів підігрівається димовими газами до температури близько 400 °С. Потім її спрямовують в апарат 2 гідрування сіркоорганічних сполук до сірководню. Далі природний газ, очищений від сірководню, змішують з водяною парою у співвідношенні 1 : 4. Отриману парогазову суміш подають у підігрівник, розміщений у конвективній частині трубчастої печі, де її температура підвищується до 500...550 °С за рахунок тепла димових газів.

Нагріта парогазова суміш надходить далі в реакційні труби, встановлені в радіаційній камері трубчастої печі, у яких на нікелевому каталізаторі відбувається конверсія природного газу водяною парою. У процесі конверсії метан окиснюється в трубчастій печі водяною парою за такою основною реакцією:



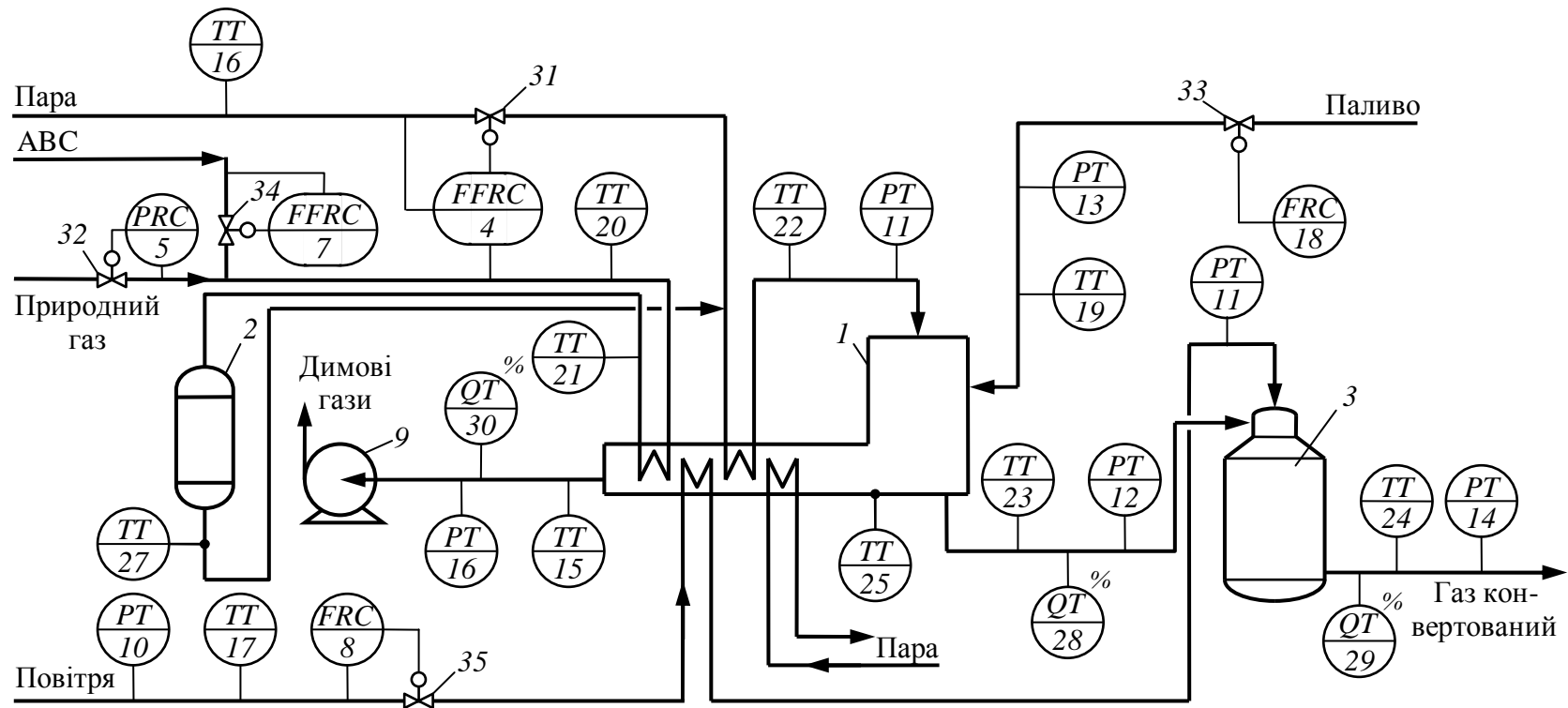


Рис. 6.11. Технологічна схема та схема автоматизації процесу конверсії метану у трубчастій печі:  
 1 – трубчаста піч; 2 – апарат гідрування; 3 – шахтний реактор; 4, 7 – регулятори співвідношення витрат;  
 5 – регулятор тиску; 6, 8 – регулятор витрати; 9 – димосос; 10–15 – датчики тиску; 15–27 – датчики температури;  
 28–30 – датчики складу; 31–35 – регулювальні клапани

Тепло, потрібне для реакції, отримують спалюванням природного газу в міжтрубному просторі печі. Димові гази, що утворюються в результаті згорання палива в трубчастій печі, викидаються в атмосферу димотягом 9. З реакційних труб конвертований газ, що містить близько 10 % залишкового метану, за температури 800...830 °С надходить у змішувач шахтного реактора 3. Сюди ж під тиском 3 МПа подається технологічне повітря, нагріте до 500 °С у конвективній частині трубчастої печі. У шахтному реакторі 3 відбувається майже повна конверсія метану, що залишився в газі після трубчастої печі, і введення до складу отриманого технологічного газу азоту, потрібного для стадії синтезу аміаку. На виході шахтного реактора отримують конвертований газ за температури 980...1000 °С із залишковим умістом метану близько 0,5 %.

**Автоматизація процесу конверсії метану в трубчастій печі.** Реалізуючи послідовний двоступеневий процес конверсії метану, у якому на першій стадії відбувається парова конверсія (у трубчастій печі), а на другій – пароповітряна (шахтна доконверсія), склад конвертованого газу на виході шахтного реактора визначається складом, тиском і температурою конвертованого газу на виході трубчастої печі.

Зі збільшенням температури на виході трубчастої печі та співвідношення *пара : газ* на її вході залишковий вміст метану в газі після печі зменшується. Задане співвідношення *пара : газ* підтримується регулятором співвідношення 4 зміною кількості подаваної пари за допомогою регулювального клапана 31. Тиск природного газу стабілізується регулятором 5, який впливає на регулювальний клапан 32 подавання природного газу. Температура на виході трубчастої печі підтримується регулятором 16 змінюванням подавання паливного газу в піч за допомогою регулювального клапана 33. Передбачено також регулювання співвідношення витрат *природного газу : АВС*, які через піч 1 подаються в апарат 2, за допомогою регулятора співвідношення 7, що впливає на регулювальний клапан 34 подавання АВС.

Заданий режим у шахтному реакторі 3 підтримують змінюванням подавання в нього повітря за допомогою регулятора 8 і регулювального клапана 35.

Основні контрольовані параметри процесу конверсії метану:

- тиски пари (датчик 6), повітря (датчик 10), парогазової суміші на вході в трубчасту піч (датчик 11), конвертованого газу на виході з трубчастої печі (датчик 12), палива (датчик 13), конвертованого газу на виході шахтного реактора (датчик 14) і димових газів перед димотягом (датчик 15);

- температури повітря на вході трубчастої печі (датчик 17), пари (датчик 18), палива (датчик 19), суміші природного газу і АВС на входах у трубчасту піч (датчик 20) та апарат 3 сіркоочищення (датчик 21), парогазової суміші на вході реакційних труб печі (датчик 22), конвертованого газу на виході печі (датчик 23) й шахтного реактора (датчик 24), димових газів на виході з радіаційної камери печі (датчик 25) і перед димотягом (датчик 26), суміші газів на виході апарата 2 (датчик 27);

- склади конвертованого газу після трубчастої печі (датчик 28) і шахтного реактора (датчик 29) – уміст метану; димових газів на виході трубчастої печі (датчик 30) – уміст кисню.

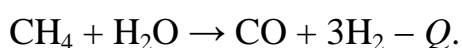
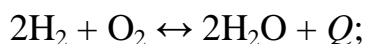
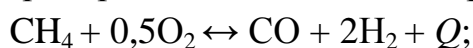
## 6.9.2. Процес пароповітряної каталітичної конверсії природного газу у шахтному реакторі

Технологічну схему пароповітряної каталітичної конверсії природного газу у шахтному реакторі показано на рис. 6.12. Гарячий газ після трубчастої печі змішується з водяною парою і спрямовується до шахтного реактора, у якому відбувається друга стадія конверсії. Після конверсії метану газ потрапляє на конверсію монооксиду вуглецю, промивається від діоксиду вуглецю розчином моноетаноламіну і спрямовується для синтезу аміаку.

Шахтний реактор призначено для проведення майже повної конверсії метану, що залишився у газі після трубчастої печі та введення до складу отриманого технологічного газу потрібної кількості атмосферного азоту. Апарат являє собою вертикально розміщену металеву обичайку 6, виготовлену з маловуглецевої котлової сталі. Верхня конусна частина апарата є основою привареного до нього корпусу змішувальної камери 4. Нижня частина обичайки закінчується конічним днищем з двома боковими відводами конвертованого газу. Внутрішню поверхню реактора футеровано монолітним вогнетривким бетоном 3 завтовшки приблизно 300 мм. Опорне склепіння 10 та насадні тіла 9, що застосовуються в апараті, виготовлені з корунду високої чистоти. Шахтний реактор повністю охоплений водяною сорочкою 7.

Конвертований газ за температури 1080...1100 К потрапляє з трубчастої печі футерованим колектором у змішувальну камеру 4 шахтного реактора, туди ж компресором подається технологічне повітря (воно не має містити сполук сірки та хлору).

У шахтному реакторі перебігають такі основні реакції:



У вільному просторі верхньої частини шахтного реактора частина водню і метану, які містяться в конвертованому газі, що надходить із трубчастої печі, згоряє з киснем повітря; при цьому виділяється тепло, потрібне для ендотермічної реакції метану, що залишився, з водяною парою на нікелевому каталізаторі 2 шахтного реактора. Об'єм повітря для процесу у шахтному реакторі підбирають так, щоб перед відділенням синтезу аміаку забезпечити співвідношення  $\text{H}_2 : \text{N}_2 = 3 : 1$ . Перед уведенням у конвертор метану в повітря постійно дозується водяна пара з тиском 4,1 МПа і температурою 640 К. Співвідношення *пара : повітря* становить 0,1 : 1. Відповідно до витрати газу регулюється витрата пароповітряної суміші, забезпечуючи температуру пароповітряної суміші на вході до реактора 755...773 К. Під час змішування потоків швидкість течії повітря із сопел розподільного пристрою досягає 60 м/с, а швидкість руху газу в циліндричній частині змішувача – 20 м/с.

Після змішувача парогазоповітряна суміш потрапляє на нікелевий каталізатор. Для запобігання перегріванню та забезпечення нормального режиму роботи каталізатора над ним у конверторі метану є вільний об'єм, де



відбувається згорання частини газу з киснем повітря. Теплове навантаження у вільному об'ємі шахтного реактора сягає понад  $117 \cdot 10^6$  кДж/м<sup>3</sup>. Середня температура парогазової суміші над каталізатором після зв'язування кисню повітря горючими компонентами конвертованого газу, переважно воднем, становить 1573 К.

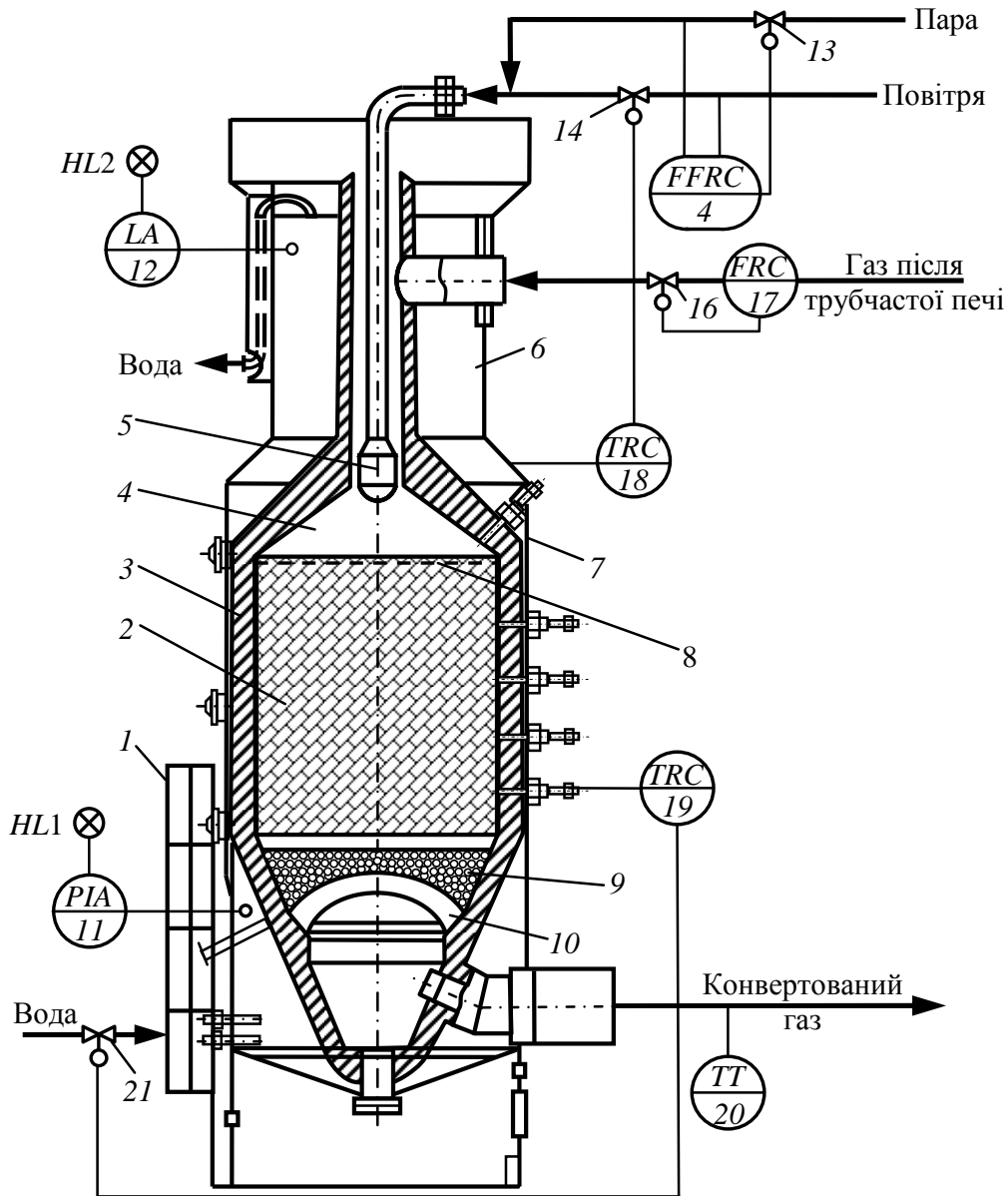


Рис. 6.12. Схема автоматизації процесу конверсії природного газу в шахтному реакторі: 1 – драбина; 2 – шар каталізатора; 3 – футерування; 4 – змішувальна камера; 5 – розподільний пристрій; 6 – корпус конвертора; 7 – водяна оболонка (сорочка); 8 – захисний прошарок; 9 – корундові кулі; 10 – склепіння; 11 – електроконтактний манометр; 12 – сигналізатор рівня; 13, 14, 16 – регульовальні клапани; 15 – регулятор співвідношення; 17 – регулятор витрати; 18, 19 – регулятори температури; 20 – датчик температури

На опорне склепіння 10, виготовлене з фасонних корундових деталей, кладуть три шари корундових куль 9 діаметрами 70, 50 та 20 мм відповідно і розміщують нікелевий кільцеподібний або циліндричний каталізатор

об'ємом  $32 \text{ м}^3$  і потім –  $6 \text{ м}^3$  алюмохромового каталізатора. На нього по периметру апарата кладуть кільцеву корундову цеглу і всю поверхню каталізатора закривають щільно укладеними шестигранними корундовими плитками, що мають по 12 отворів для проходження газу. Плитки, вкладені у центрі, під розподільником повітря, отворів не мають. Така конструкція розподільної корундової решітки над шаром каталізатора забезпечує низькі температурні градієнти у поперечному перерізі шару каталізатора та рівномірне розподілення потоків газу шаром. Температура газу на виході з реактора не перевищує  $1250 \dots 1300 \text{ К}$ .

Окиснення метану киснем у шахтному реакторі – процес сильно екзотермічний, тому процес пароповітряної конверсії перебігає автотермічно. При цьому передбачено охолодження реакційної суміші та шару каталізатора за допомогою водяної сорочки. Крім того, у шарі каталізатора можуть виникати локальні перегріву, спричинені нерівномірністю потоків, ерозією матеріалу каталізатора тощо, тому для запобігання вибуху реактора від теплового навантаження у разі перегрівання реакційної суміші витрату охолоджувальної води має бути збільшено. Об'ємна частка залишкового вмісту метану в сухому конвертованому газі становить  $0,35 \dots 0,55 \%$ .

**Автоматизація конверсії природного газу у шахтному реакторі.** Оскільки час контактування газової суміші з шаром каталізатора у шахтному реакторі чітко визначений, то об'ємна витрата конвертованого газу після трубчастої печі має перебувати у встановлених межах. Регулювання об'ємної витрати газу після трубчастої печі здійснюється регулятором 17 через зміну подавання конвертованого газу за допомогою регулювального клапана 16.

Підтримання потрібної температури у зоні над каталізатором забезпечується регулятором 18 зміною витрати пароповітряної суміші (відповідно до витрати газу) за допомогою регулювального клапана 14. Задане співвідношення між витратами пари та повітря на вході в змішувальну камеру шахтного реактора забезпечується регулятором співвідношення 15 через зміну подавання пари за допомогою регулювального клапана 13. Регулювання температури в шарі каталізатора здійснюється регулятором 19 через зміну подавання води у водяну оболонку (сорочку) шахтного реактора за допомогою регулювального клапана 21.

Частина охолоджувальної води в оболонці реактора перетворюється на пару, тому з водяної оболонки виходить пароводяна емульсія. Для запобігання розриву оболонки слід контролювати в ній тиск та рівень води. Датчик-реле рівня 12 забезпечує сигналізацію перевищення рівнем води в оболонці реактора граничнодопустимого значення, електроконтактний же манометр 11 – граничнодопустимого тиску.

Після шахтного реактора утворений синтез-газ охолоджується, тому слід вимірювати температуру на виході з шахтного реактора. Автоматичний контроль температури на виході з шахтного реактора здійснюють за допомогою датчика температури 20.

## 6.10. ПРОЦЕС АЛКІЛУВАННЯ БЕНЗОЛУ

Алкілування – процес уведення алкільних груп у молекули органічних і деяких неорганічних речовин. Вони є проміжними стадіями у виробництві мономерів для синтетичного каучуку, мийних речовин та інших продуктів.

Процес алкілування – каталітичний, каталізатор у ньому – фосфорна чи сірчана кислота, хлорид алюмінію тощо. Найбільшого поширення набув процес алкілування бензолу пропіленом за наявності хлориду алюмінію, у результаті чого отримують ізопропілбензол (кумол), який використовують для виробництва фенолу, ацетону, а також як високооктановий компонент авіаційних палив. Сировина для виробництва ізопропілбензолу – пропан-пропіленова фракція, що містить 40...80 % пропілену, та бензол. Хлорид алюмінію вводять у кількості 8...10 % від алкілату. Процес ведуть під тиском 0,5...1 МПа за температури 90...130 °С.

Автоматизована система керування процесом алкілування бензолу призначена для підтримки оптимального співвідношення бензолних і алкільних груп. Об'єктом регулювання є апарат (алкілятор), призначений для проведення процесу алкілування бензолу пропіленом. В алкілятор подають осушений бензол, свіжий каталізаторний комплекс (СКК), пропан-пропіленову фракцію (ППФ), поліалкілбензол (ПАБ) і зворотний каталізаторний комплекс (ЗКК). З алкілятора виводиться реакційна маса разом з непрореагованими газами (абгази). У відстійнику 2 з реакційної маси виокремлюється захоплений важкий каталізаторний шар, який повертається в алкілятор. В абгазах містяться пари бензолу, що після уловлювання повертаються в процес. У системі регулювання, поданій на рис. 6.13, за основний незалежний параметр взято витрату бензолу, яка визначає продуктивність алкілятора.

Витрата пропілену  $F_{\text{ППФ}}$  підтримується залежно від витрат бензолу ( $F_6$ ), поліалкілбензолу ( $F_{\text{ПАБ}}$ ), каталізаторного комплексу ( $F_{\text{КК}}$ ) і тиску  $P$  в алкіляторі, відповідно до лінійного рівняння

$$F_{\text{ППФ}} = a_0 + a_1 F_6 - a_2 F_{\text{ПАБ}} + a_3 F_{\text{КК}} - a_4 P,$$

де  $a_0, a_1 - a_4$  – коефіцієнти.

Розрахунок за цим рівнянням здійснюється обчислювальним пристроєм 14, який реалізує операцію множення вхідних змінних на постійний коефіцієнт  $k$  із наступним алгебричним додаванням результатів. Коефіцієнти  $a_0, a_1 - a_4$  визначаються з прийнятого механізму реакції й уточнюються статистично. На обчислювальний пристрій 14 подають сигнали з датчиків 4, 5, 6 і 11, пропорційні відповідно витратам бензолу, ПАБ, СКК та тиску в алкіляторі. Зі збільшенням витрати бензолу та каталізаторного комплексу і зменшенням витрати поліалкілбензолу відповідно до коефіцієнтів  $a_1 - a_4$  збільшується витрата ППФ.

Корекцію витрати ППФ за тиском в алкіляторі введено з метою усунення неврахованих збурювальних впливів, наприклад, активності каталітичного комплексу, якості бензолу та ППФ й інших факторів. Зі збільшенням або зменшенням тиску в алкіляторі витрата ППФ відповідно зменшу-

ється або збільшується. Крім того, передбачене регулювання подачі свіжого каталізаторного комплексу і видалення із системи ЗКК залежно від його складу, що може бути визначений за допомогою датчика електропровідності. Для цього регулятор 13 складу ЗКК впливає на регулювальний клапан 19 виведення із системи ЗКК і на регулятор 10 витрати СКК, змінюючи цим подавану їх кількість в алкілятор.

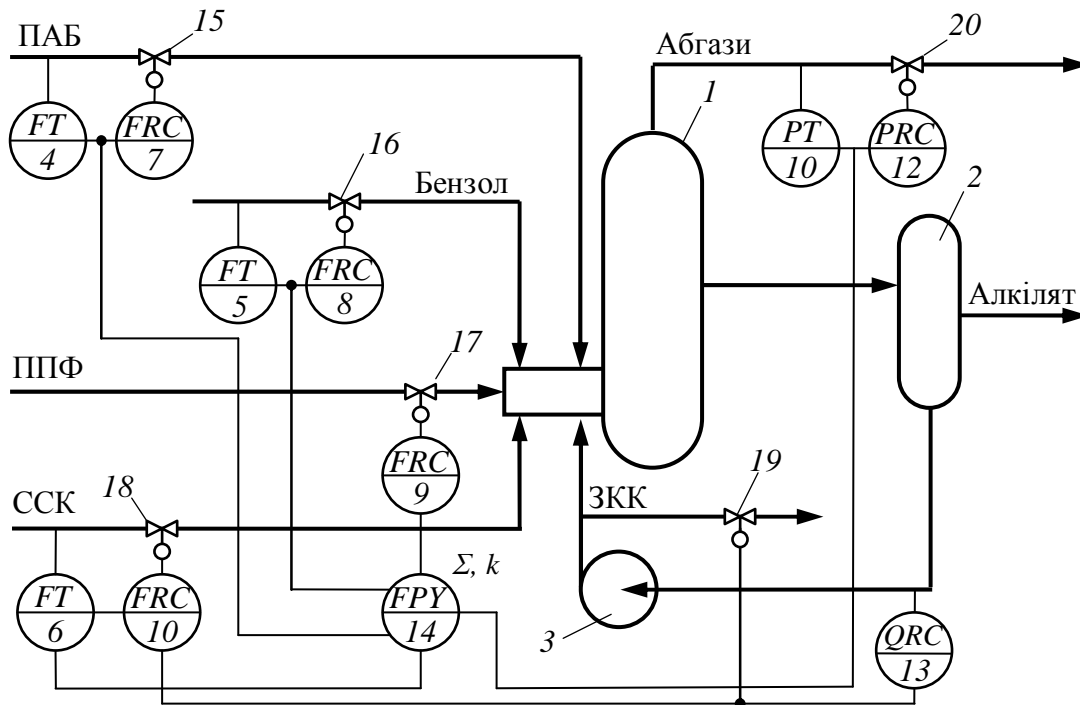


Рис. 6.13. Схема автоматичного регулювання процесу алкілування бензолу: 1 – алкілятор; 2 – відстійник; 3 – насос; 4–6 – датчики витрат; 7–10 – регулятори витрат; 11 – датчик тиску; 12 – регулятор тиску; 13 – регулятор складу каталізаторного комплексу; 14 – обчислювальний пристрій; 15–20 – регулювальні клапани

## 6.11. ПРОЦЕС ГІДРООЧИЩЕННЯ ДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА

Процес гідроочищення дизельного палива призначено для видалення сірчистих сполук із прямогонного дизельного палива. Показник ефективності процесу – склад очищеного палива (гідрогенізату).

Схему автоматизації реакторного блока установки гідроочищення дизельного палива показано на рис. 6.14. Сировина (її витрата стабілізується за допомогою регулятора 1 і регулювального клапана 2) змішується з циркуляційним водневмісним газом, витрата якого контролюється за допомогою датчика 3.

Газосировинна суміш, пройшовши через теплообмінник 4, нагрівається в печі 5 до температури реакції. Температуру продукту на виході печі стабілізують за допомогою регулятора 6 впливом на регулювальний клапан 7 подавання палива в піч. Після трубчастої печі нагріта суміш проходить послідовно через реактори 8 і 9. У реакторах сірка, що міститься в дизельному паливі, сполучається з воднем циркуляційного газу.

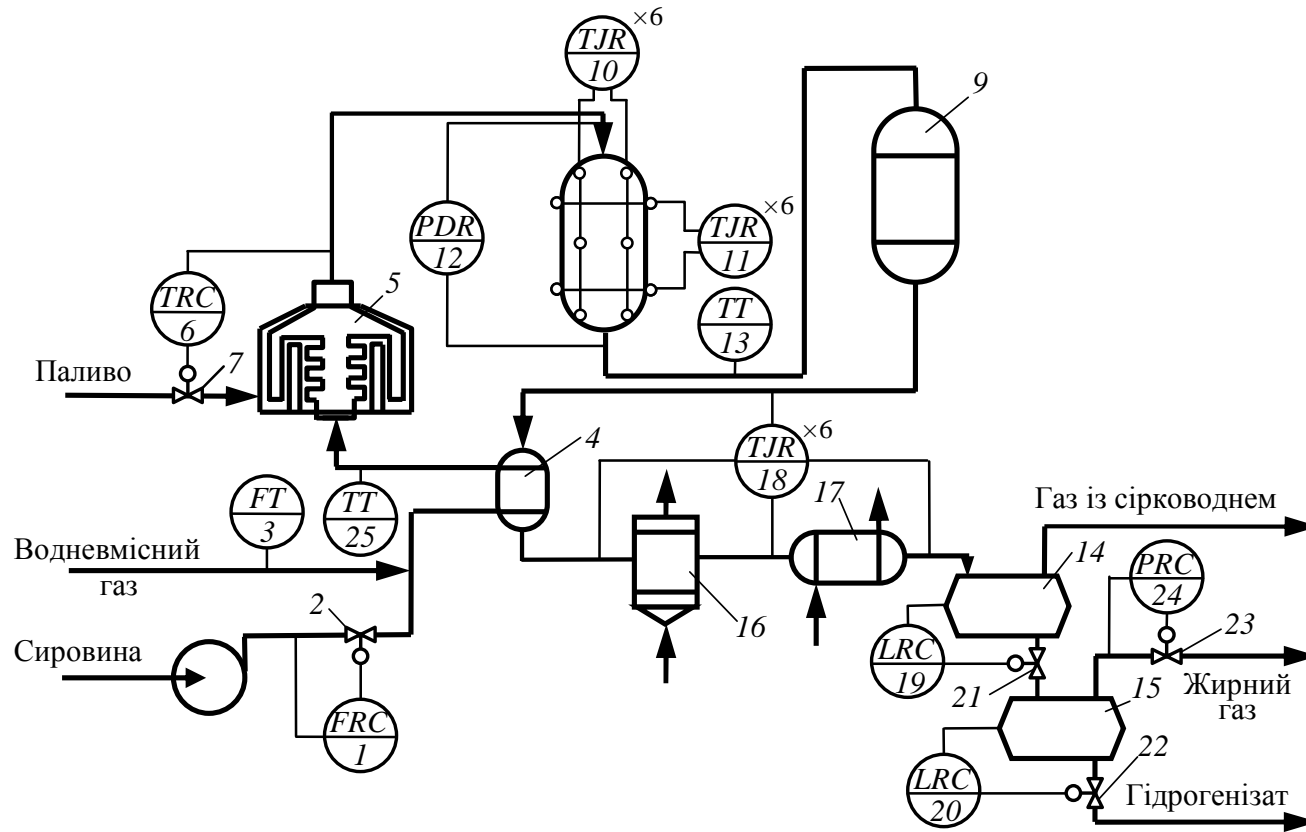


Рис. 6.14. Схема автоматизації реакторного блоку установки гідроочищення дизельного палива:  
 1 – регулятор витрати; 2, 7, 21, 23 – регульовальні клапани; 3 – датчик витрати; 4 – теплообмінник;  
 5 – трубчаста піч; 6 – регулятор температури; 8, 9 – реактори; 10, 11, 18 – багатоточкові автоматичні  
 потенціометри; 12 – датчик перепаду тисків; 13, 25 – датчики температури; 14, 15 – сепаратори;  
 16, 17 – холодильники; 19, 20 – регулятори рівня; 24 – регулятор тиску

Під час роботи реакторів особливу увагу приділяють контролю теплового режиму, для чого в них встановлено багатозонні термоелектричні перетворювачі, підключені до багатоточкового автоматичного потенціометра 10 (автоматизація реакторів аналогічна, тому її показано на прикладі одного реактора). Температуру зовнішніх стінок реакторів контролюють за допомогою розміщених у різних точках датчиків температури і багатоточкового автоматичного потенціометра 11.

Стан каталізатора (ступінь його закоксованості) оцінюють опосередковано – за перепадом тисків на вході і виході реакторів, вимірюваним датчиком 12. Температуру продуктів реакції на виході реактора 8 контролюють датчиком 13. Перед поділом продуктів реакції їх тепло використовують для нагрівання газосировинної суміші в теплообміннику 4. Перед поділом продуктів реакції в сепараторах 14 і 15 відповідно високого і низького тисків вони охолоджуються в повітряному та водяному холодильниках 16 і 17.

Температури продуктів реакції на вході та виході теплообмінника 4, а також на виходах холодильників 16 і 17 контролюють за допомогою багатоточкового автоматичного потенціометра 18. Із верхньої частини сепаратора 14 відводиться насичений сірководнем циркуляційний газ, а з нижньої – гідрогеніза́т, який у сепараторі 15 частково звільняється від розчиненого в ньому так званого жирного газу, що містить низку компонентів. Із сепаратора 15 гідроочищене дизельне паливо надходить на стабілізацію. Рівень у сепараторах регулюють дією регуляторів 19 і 20 на регулювальні клапани 21 і 22 відбору гідрогенізату. Тиск у сепараторі 15 стабілізують регулятором 23, скидаючи газ регулювальним клапаном 24.

## 6.12. ПРОЦЕС УПОВІЛЬНЕНОГО КОКСУВАННЯ

Коксування нафтових залишків і висококиплячих дистилатів вторинного походження використовують для одержання малозольного електродного коксу, застосовуваного в алюмінієвій промисловості. Одночасно одержувані коксові дистилати скеровують у подальшу переробку для одержання світлих нафтопродуктів. Коксування ведуть за тиску 0,1...0,3 МПа і температури 480...540 °С.

Автоматична система контролю та регулювання режиму трубчастої печі установки уповільненого коксування призначена для стабілізації основних параметрів нагрівання первинної і вторинної сировини перед коксуванням.

На установках уповільненого коксування первинна сировина (суміш гудрону чи крекінг-залишку) нагрівається в конвекційних зміювиках трубчастої печі, після чого подається в ректифікаційну колону, де за рахунок контакту з нафтовими парами, що надходять із реакторів, збагачується продуктами рециркуляції. В результаті утворюється вторинна сировина, що насосами подається в реакційні зміювики печі для швидкісного високотемпературного нагрівання.

Для створення високих швидкостей і запобігання коксовідкладанню в трубах печі у потік вторинної сировини при вході в піч подається турбулізатор

(конденсат водяної пари). Нагріта в печі до 490...510 °С вторинна сировина надходить у реактор, де завершується процес часткового випаровування, розпочатого в печі, деструктивного розкладання сировини й уповільненого коксування. Через високі температури і в'язкість сировини, що нагрівається, схильність її до коксування, наявність механічних домішок, малих витрат турбулізатора й інших факторів автоматизація трубчастих печей ускладнена.

Основним фактором, який впливає на продуктивність і тривалість міжремонтного пробігу, є швидкість закоксування змійовика трубчастої печі, що залежить переважно від якості сировини і режиму роботи печі. Температурний режим печі потрібно вести так, щоб у змійовику проходили переважно фізичні процеси нагрівання і випаровування, а процеси крекінгу, конденсації й ущільнення, тобто утворення коксу, відбувалися у реакторах.

Трубчасті печі установки уповільненого коксування працюють у жорстких умовах, які характеризуються високою температурою нагрівання сировини і малими припустимими відхиленнями її від заданого значення. Навіть короткочасне відхилення температури від заданої приведе до закоксування чи навіть прогорання труб, порушення технологічного процесу установки і скорочення міжремонтного пробігу.

З огляду на важливість достовірного контролю теплового навантаження печі по кожному (лівому і правому) потоку сировини, під час оцінювання стану реакційної зони змійовиків доцільно поряд з вимірюванням витрат сировини і загальної витрати паливного газу вимірювати витрати газу в кожному камеру згорання печі. Як характеристику стану змійовика печі (ступеня її закоксованості) можна використовувати перепад температур на коксівній ділянці.

Одним з найважливіших параметрів процесу уповільненого коксування, що визначає умови роботи печей, кількість і якість продуктів фракціонування, є коефіцієнт рециркуляції сировини (КР):

$$K_p = F_{\text{вт}} \rho_{\text{вт}} / (F_{\text{пер}} \rho_{\text{пер}}) ,$$

де  $F_{\text{вт}}$ ,  $F_{\text{пер}}$  – витрати відповідно вторинної та первинної сировини;  $\rho_{\text{вт}}$ ,  $\rho_{\text{пер}}$  – густини відповідно вторинної і первинної сировини.

Схему системи автоматичного контролю та регулювання технологічних параметрів трубчастої печі установки уповільненого коксування наведено на рис. 6.15, де показано одну піч. Фактично установка містить дві аналогічні за будовою та системами керування роботою печі, що працюють на рівнобіжних потоках сировини.

Відповідно до схеми автоматичному контролю підлягають:

- загальна витрата первинної сировини в піч (датчик 18);
- загальна витрата вторинної сировини в піч (датчик 17);
- витрати вторинної сировини в кожному потоці печі (датчики 15 і 16);
- коефіцієнт рециркуляції сировини (обчислювальний пристрій 26);
- температури по довжині кожного змійовика (датчики 3–7 і 8–12); перепад температур на коксівній частині кожного змійовика (датчики 6, 7 і 11, 12);
- витрата газу в кожному камеру згорання (датчики 13 і 14).

Автоматичному регулюванню підлягають такі параметри: тиск паливного газу (регулятор 23 і клапан 27); температури нагрівання вторинної сировини в точці кожного змійовика печі, що передує зоні активного коксоутворення (зміна подачі паливного газу в камеру згорання забезпечується регуляторами температури 19, 20 та клапанами 28, 31); витрата турбулізатора (пари), що подається у вторинну сировину (регулятори 21, 22 та клапани 29, 30).

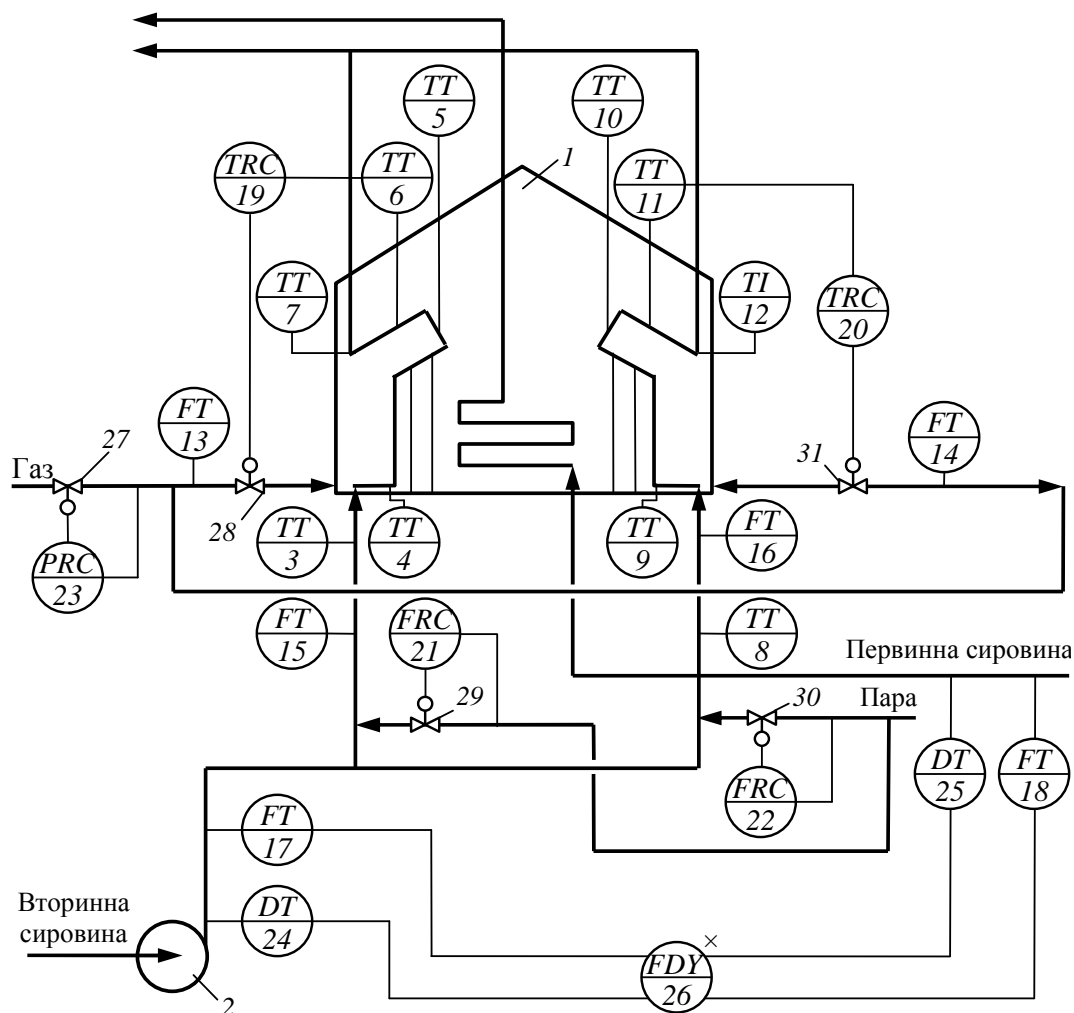


Рис. 6.15. Схема системи автоматичного контролю та регулювання технологічних параметрів трубчастої печі установки уповільненого коксування: 1 – трубчаста піч; 2 – насос; 3–12 – датчики температур; 13–18 – датчики витрат; 19, 20 – регулятори температур; 21, 22 – регулятори витрат; 23 – регулятор тиску; 24, 25 – густиноміри; 26 – обчислювальний пристрій; 27–31 – регулювальні клапани

Система автоматичного контролю коефіцієнта рециркуляції сировини працює в такий спосіб. Сигнали з датчиків 17 і 18 витрати відповідно вторинної та первинної сировини і густиномірів 24 та 25 надходять в обчислювальний пристрій 26, який реалізує наведене рівняння для розрахунку  $K_p$ . За значенням коефіцієнта рециркуляції оператор робить висновок про роботу печі і реактора. Залежно від виробничої потреби можна поліпшити якість отриманого коксу, збільшуючи коефіцієнт рециркуляції, однак продуктивність установки при цьому знижується.



## 6.13. СИСТЕМИ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД

Склад і концентрація забруднень стічних вод більшості виробничих об'єктів хімічних галузей промисловості не дозволяють скидати їх у водойми без попереднього оброблення. До основних методів очищення стічних вод належать: механічні (проціджування, відстоювання, фільтрування); хімічні чи реагентні (нейтралізація кислот і лугів, виділення металів, хімічне окиснення органічних речовин, знезаражування, коагуляція тонкодисперсних суспензій за рахунок додавання реагентів); фізико-хімічні (іонний обмін, електрохімічне окиснення та відновлення, екстракція, термічне оброблення спалюванням); біохімічні (біохімічне окиснення органічних речовин, анаеробне зброджування).

Кожен з цих методів окремо чи у визначеній сукупності застосовують для очищення стічних вод усіх хімічних виробництв. Наприклад, очищення загального стоку підприємств штучного волокна виконують за схемою: змішування всіх стоків, їх нейтралізація, відстоювання, підлужування та біохімічне очищення. Реагентне оброблення та біохімічне очищення – неодмінний і основний спосіб очищення стічних вод, що скидаються підприємствами основної, азотної та нафтохімічної галузей промисловості, виробництвами синтетичного каучуку, пластичних мас та ін.

Далі розглянуто способи автоматизації хімічного, фізико-хімічного та біохімічного методів очищення стічних вод.

### 6.13.1. Хімічне очищення стічних вод

На станціях хімічного очищення переважного поширення набуло оброблення стічних вод різними реагентами. Реагентне очищення виробничих стічних вод найчастіше застосовують для коагуляції колоїдних і завислих речовин, нейтралізації кислот і лугів, звільнення від іонів важких металів, знешкодження отруйних речовин (наприклад, ціанідів, хрому). Ці методи застосовують і для руйнування органічних та поверхневоактивних речовин. Незважаючи на таку різноманітність завдань, установки для реагентного очищення стічних вод більш-менш однотипні за складом споруд і видами устаткування (немало з них в інженерній практиці відомі під назвою станцій нейтралізації, хоча функції їх набагато ширші).

Схему системи контролю та керування очищенням стічних вод, що скидаються заводом штучного волокна, показано на рис. 6.16.

**Технологічна схема процесу.** Технологією оброблення кислих і лужних стоків передбачено їх взаємну нейтралізацію, реагентне оброблення з наступним відстоюванням суспензії та віддуванням газів, фільтрування, завершальну нейтралізацію фільтрату, ущільнення осаду та його механічне зневоднення. Кислі та лужні стоки подають на очищення окремо в резервуари 1 і 2, у яких відбувається певне вирівнювання складу стоків. У змішувачі 3 здійснюється взаємна нейтралізація кислих і лужних стоків і віддування основної маси сірководню та сірководню. Потім стоки надходять у змішувач 4, де піддаються обробленню вапняним молоком.

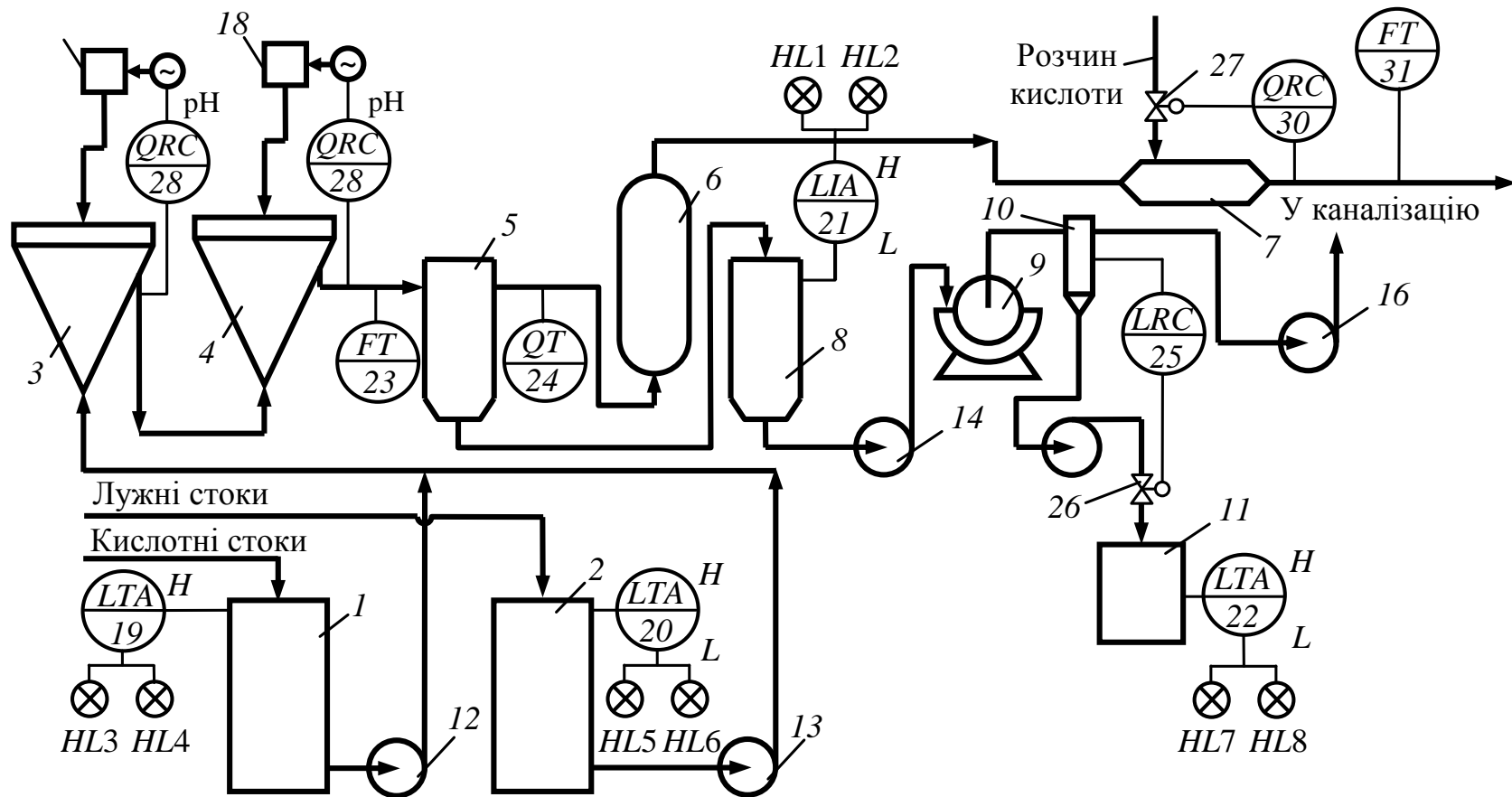


Рис. 6.16. Принципова схема контролю та регулювання комплексу очищення стічних вод:  
 1, 2 – резервуари; 3, 4 – змішувачі; 5 – відстійник; 6 – освітлювач; 7 – йоржовий змішувач; 8 – декантатор; 9 – вакуум-фільтр;  
 10 – ресивер; 11 – резервуар; 12–16 – насоси; 17, 18 – дозатори; 19–22 – датчики рівня; 23, 31 – датчики витрати;  
 24 – датчик каламутності; 25 – регулятор рівня; 26, 27 – регулювальні клапани; 28–30 – регулятори рН

На виході зі змішувача слід підтримувати стає значення рН = 9...10. У цьому разі розчинений у воді сульфат цинку переходить у малорозчинний гідроксид цинку. Утворений осад випадає у відстійнику 5. Далі освітлена вода додатково очищується в освітлювачі 6.

Оскільки очищена вода має підвищену лужність, то перед скиданням у каналізацію її підкислюють. Для цього її подають у закритий напірний йоржовий змішувач 7, на вхід якого подають розчин сірчаної кислоти. На виході зі змішувача 7 значення рН має підтримуватися рівним 7. Нейтралізовані стоки після змішувача 7 скидають у каналізацію. Осад з відстійника 5 з вологістю 98 % ущільнюється в декантаторі 8 і після зниження вологості до 96 % подається для механічного зневоднення в барабанний вакуум-фільтр 9. Вода з вакуум-фільтра 9, перетікаючи через ресивер 10, надходить у резервуар 11 і надалі використовується для промивання контактних освітлювачів.

**Автоматизація процесу.** Рівень стічних вод у резервуарах 1 і 2 контролюється датчиками рівня 19 і 20, у декантаторі 8 – датчиком 21, а в резервуарі 11 – датчиком 22 (датчики 19–22 забезпечують також сигналізацію граничнодопустимих значень рівнів). Витрата оброблюваних стоків на вході у відстійник 5 контролюється датчиком 23, а витрата стоків, які скидаються в каналізацію, – датчиком 31. Робота відстійника контролюється за допомогою датчика каламутності 24. Рівень рідини в ресивері 10 регулюється регулятором 25, який керує клапаном 26 на трубопроводі подання декантату. Автоматичне регулювання величини рН у змішувачах 3 і 4 виконують регулятори 28 і 29, які впливають на приводи дозаторів 17 і 18, що забезпечують дозування вапняного молока в змішувачі 3 та 4. Подання кислоти в йоржовий змішувач 7 регулюється за допомогою регулятора рН 30 і регулювального клапана 27.

### 6.13.2. Термічне оброблення стічних вод

Очищення промислових стоків, що містять органічні та мінеральні речовини широкого складу й високої концентрації (до яких належать, наприклад, стоки виробництва капролактаму), із застосуванням механічних, біохімічних, хімічних та інших методів або не дає позитивного ефекту, або нецільне з економічного погляду. Один з перспективних методів знешкодження таких промислових стоків – термічний (вогневий), а найбільш ефективні й універсальні установки для вогневого знешкодження промислових стоків – апарати вихрового типу, зокрема циклонні реактори.

Процес термічного знешкодження перебігає у вертикальній циклонній камері, призначеній для повного згорання органічних відходів, нейтралізації  $SO_2 + SO_3$  та  $HCl$  в об'ємі камери й уловлювання розплаву мінеральних солей, що виводяться через льотку. Камеру обладнано тангенціальними входами паливно-повітряної суміші та гарячого вторинного повітря і трьома ярусами механічних форсунок для розпилювання стоків. Охолодження камери водяне, зона горіння природного газу футерована вогнетривкою цеглою.

Паливно-повітряна суміш і вторинне повітря з високою швидкістю (30–100 м/с) вводяться в циклонну камеру й утворюють у ній інтенсивну вихрову систему. Зону горіння органічних домішок стоків розміщено в нижній частині камери. Завдяки розпилюванню кислих і лужних стоків у високотемпературній

зоні (до 1700 °С) забезпечується інтенсивний перебіг процесів випаровування вологи, реакцій термічного розкладання органічних домішок та окиснення горючих складових, реакцій лугів і кислот з утворенням мінеральних солей та перегонном деяких солей. Температура відхідних димових газів становить 800 °С. Якість знешкодження стоків визначається кількістю токсичних газових викидів в атмосферу (зокрема, концентрацією оксиду вуглецю в димових газах) та енергетичними витратами. Регулювання процесу знешкодження значно ускладнюється безупинно змінюваним складом стоків, які подаються в циклон, а також тим, що на знешкодження надходять одночасно три різні за складом потоки: кубові залишки (оливи), лужні та кислі стоки.

Визначення складу сумарного стоку й окремих його складових пов'язане з відбираннями проб і тривалим лабораторним аналізом. З огляду на це ефективність процесу термічного знешкодження стоків багато в чому визначається якістю системи автоматичного керування процесом, яка дозволяє в умовах неповної інформації про процес із достатньою точністю ним керувати. Структурну схему системи автоматичного керування термічним знешкодженням промислових стоків показано на рис. 6.17.

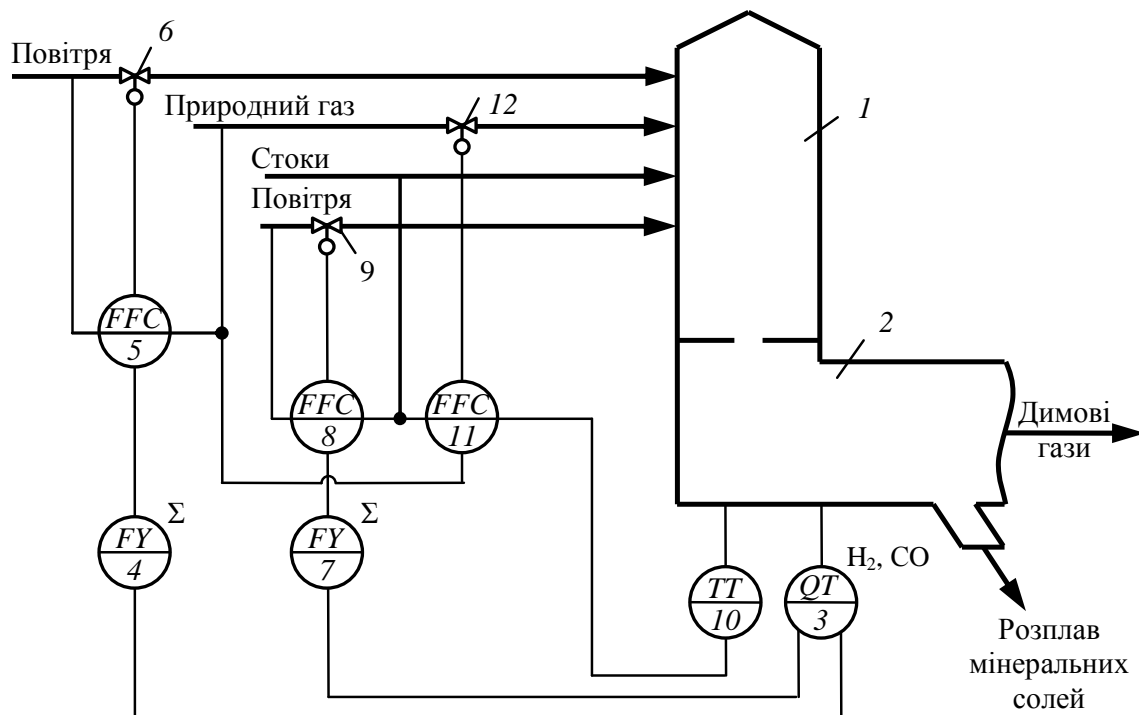


Рис. 6.17. Структурна схема системи автоматичного керування процесом термічного знешкодження промислових стоків: 1 – циклон; 2 – нагромаджувач; 3 – хроматографічний газоаналізатор; 4, 7 – суматори; 5, 8, 11 – регулятори співвідношення витрат; 6, 9, 12 – регульовальні клапани; 10 – датчик температури

Відхідні гази, що виникли унаслідок спалювання палива і термічного знешкодження стічних вод у циклоні 1, переміщуються через нагромаджувач 2 і в хвостовій частині відбираються газовідбірним пристроєм, з якого надходять у хроматографічний газоаналізатор 3 для аналізу на вміст у них водню й оксиду вуглецю. Сигнал, пропорційний концентрації водню, надходить у суматор 4, у якому формується сигнал різниці між поточним і заданим значеннями

концентрації водню, а відтак – на вхід регулятора співвідношення витрат *паливо* : *повітря* 5. Вихідний сигнал регулятора 5 подається на регулювальний клапан 6 подавання первинного повітря в циклон 1. Сигнал, пропорційний концентрації оксиду вуглецю, надходить з газоаналізатора 3 у суматор 7, на виході якого формується сигнал різниці між поточним і заданим значеннями концентрації оксиду вуглецю. Цей сигнал подається на вхід регулятора співвідношення витрат *стічні води* : *вторинне повітря* 8, який керує витратою вторинного повітря за допомогою регулювального клапана 9.

Температура димових газів у нагронадзжувачі 2 вимірюється датчиком температури 10, вихідний сигнал якого надходить на регулятор співвідношення витрат *стічні води* : *паливо* 11, який впливає на регулювальний клапан 12 подавання палива в циклон 1. Сигнал датчика температури 10 подається на регулятор співвідношення витрат 11 для забезпечення надійної роботи циклонного реактора в умовах змінного складу стічних вод для обмеження (зниження) температури нижче від критичної, за якої реакції окиснювання складових стічних вод значно вповільнюються.

### 6.13.3. Біохімічне очищення стічних вод

Пристрої біохімічного очищення стічних вод – кінцева ланка очисного комплексу. Очищення провадять в апаратах (аеротенках) чи у водоймах (ставках, каналах) окисненням органічних речовин, які містяться в стоках. Стічні води після аеротенка спрямовують у відстійники, звідки очищені стоки стікають у каналізацію, а частина мулу, що містить бактерії, рециркулює в аеротенк. Для перемішування та насичення отриманої мулової суміші киснем у нижню частину аеротенка подається повітря. Головне завдання автоматизації біохімічного очищення полягає в підтриманні на оптимальному рівні низки факторів, які забезпечують життєдіяльність мікроорганізмів (окиснювачів) в умовах, коли вміст органічних речовин і розчиненого кисню в стічній воді й активному мулі, концентрація активного мулу та інші параметри піддаються коливанням.

Систему автоматичного регулювання блока «аеротенк – відстійник», що складається з трьох контурів регулювання: концентрації розчиненого кисню, навантаження на активний мул і виведення надлишкового мулу, показано на рис. 6.18. Регулятор 3 концентрації розчиненого кисню впливає на регулювальний клапан 15 на повітроводі аеротенка 1 для підтримання заданої концентрації розчиненого кисню в усьому об'ємі мулової суміші. Контур регулювання навантаження на активний мул діє так, щоб співвідношення між кількістю забруднень, які надходять в аеротенк, і кількістю поворотного мулу залишалася сталим. Сигнали від датчика концентрації органічних сполук 7 і датчика 4 витрати стічної води перемножуються блоком множення 9, вихідний сигнал якого подається в регулятор співвідношення витрат 11. Сюди ж надходять сигнали від датчика концентрації активного мулу 8 (у повертаному мулі) та датчика витрати поворотного мулу 5, перемножені блоком 10. Регулятор співвідношення витрат 11 впливає на регулювальний клапан 13, який змінює витрату повертаного мулу.

Контур регулювання виведення надлишкового мулу діє так, щоб загальна маса мулу в аеротенку та відстійнику 2 залишалася сталою. Сигнали

від датчиків витрат стічної води та надлишкового мулу 4 і 6, датчика концентрації активного мулу 8 та блоків множення 9 і 10 надходять в обчислювальний блок 12, який розраховує масу активного мулу, що перебуває в системі очищення. Обчислювальний блок 12 впливає на регулювальний клапан 13, який змінює кількість виводжуваного із системи мулу.

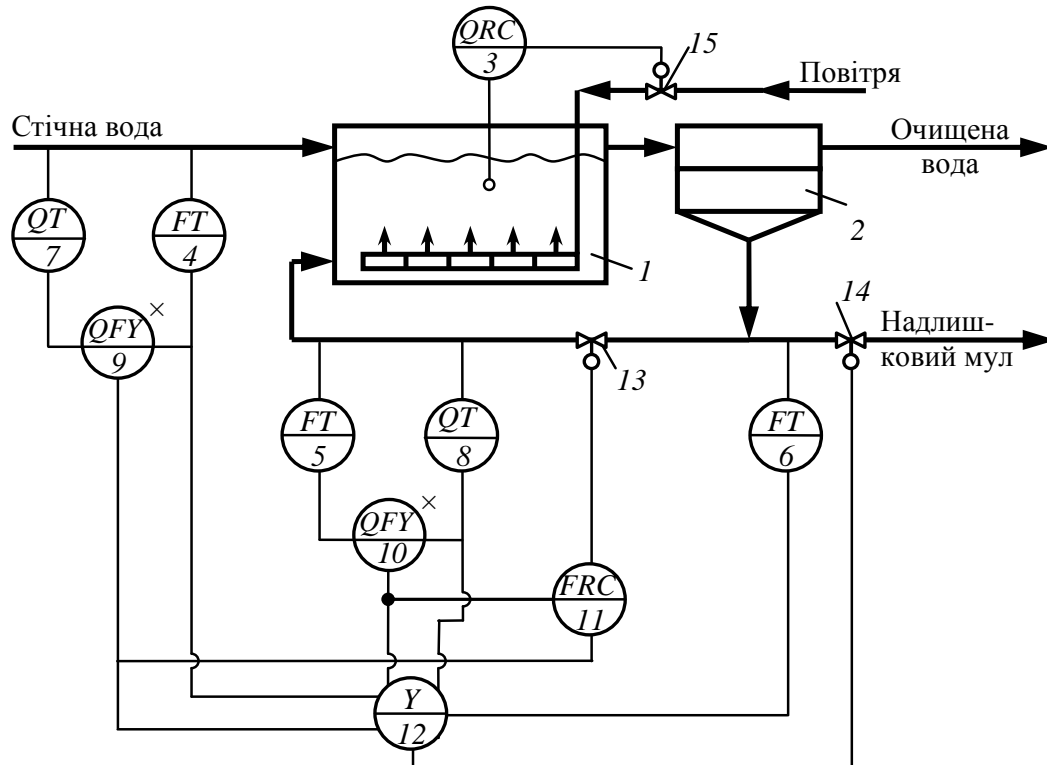


Рис. 6.18. Система автоматичного регулювання блока аеротенк – відстійник:  
 1 – аеротенк; 2 – відстійник; 3 – регулятор концентрації; 4–6 – датчики витрат;  
 7, 8 – датчики концентрацій; 9, 10 – блоки множення; 11 – регулятор співвідношення витрат; 12 – обчислювальний блок; 13–15 – регулювальні клапани

Показник ефективності процесу очищення – концентрація органічних забруднень на виході з аеротенка, а мета керування – підтримання цієї концентрації в межах граничнодопустимих значень. На цей параметр впливають концентрація органічних забруднень у вхідних стоках, витрата стоків (навантаження на очисну установку), концентрація бактерій і розчиненого кисню в намуловій суміші аеротенка, а також тривалість перебування стоків в апараті.

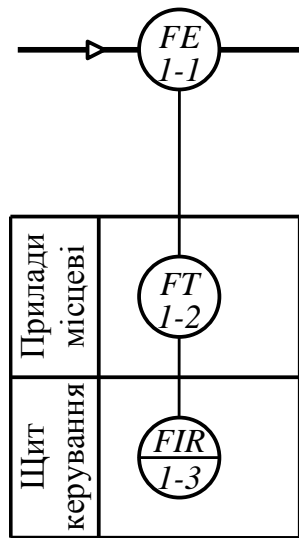
Концентрація органічних забруднень, їх витрата і, отже, час перебування стоків визначаються режимом попередніх технологічних процесів. Зазвичай вони змінюються в широкому діапазоні, тому для досягнення мети керування слід було б регулювати кінцеву концентрацію органічних речовин у стоках впливом на концентрації бактерій і розчиненого кисню в намуловій суміші. Однак автоматичних вимірювачів вмісту органічних речовин у сточних водах на тепер немає, тому процесом керують за непрямим параметром – кількістю органічних речовин у стоках, що надходять на очищення, які розраховують за витратою стоків і змінюваністю в них концентрації розчиненого кисню.

# ДОДАТКИ

## Додаток 1

### СХЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ТА СИГНАЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Приклад 1.1. Контроль витрати газу в технологічному трубопроводі



#### Комплект технічних засобів<sup>1</sup>:

– на базі пневматичних технічних засобів автоматизації: 1-1 – звужувальний пристрій: діафрагма камерна ДКС0,6-75 (перша цифра означає умовний тиск  $P_y$ , МПа, друга – внутрішній діаметр трубопроводу  $D_{тр}$ , мм); 1-2 – пневматичний передавальний перетворювач перепаду тиску 13ДД11 із квадратичною функцією перетворення; 1-3 – пневматичний показувальний і реєструвальний прилад ФК0071 (система СТАРТ);

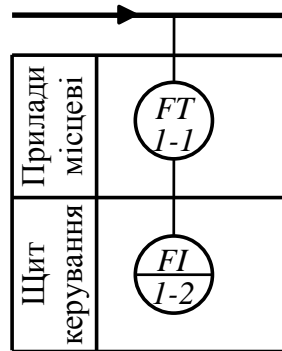
– на базі електричних технічних засобів автоматизації: 1-1 – звужувальний пристрій (окрім діафрагм – камерних і дискових, до стандартних звужувальних пристроїв також належать сопла ІСА 1932, сопла і труби Вентурі<sup>2</sup>); 1-2 – вимірювальний тензоперетворювач різниці тисків САФІР мод. 2450; 1-3 – показувальний і реєструвальний аналоговий прилад ДИСК-250П або показувальний і реєструвальний аналого-цифровий РМТ 49D/1 (обидва – із вбудованими блоками добування квадратного кореня)<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Підбираючи технічні засоби автоматизації, необхідні для реалізації наведених схем автоматизації, перевага надавалася зразкам, виробленим в Україні (прим. авт.).

<sup>2</sup> ДСТУ ГОСТ 8.586.(1–5):2009 (ІСО 5167-(1:4):2003) «Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Част. 1–5». – В Україні чинний від 1 квітня 2010 р.

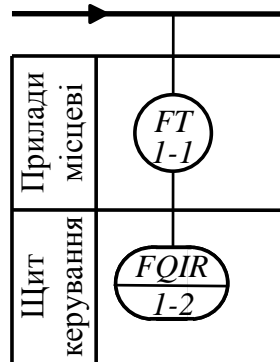
<sup>3</sup> Останнім часом замість «класичних» реєструвальних приладів із паперовими носіями (діаграмами) дедалі більшого поширення набувають електронні реєстратори, призначені для нагромадження (архівування), зберігання, оброблення (зокрема й добування квадратного кореня) та відображення інформації про стан технологічного параметра – такі, наприклад, як реєстратор електронний МТМ-РЕ-160 (виробник НВП «Мікротерм», м. Сіверодонецьк).

**Приклад 1.2. Контроль витрати рідини в технологічному трубопроводі**



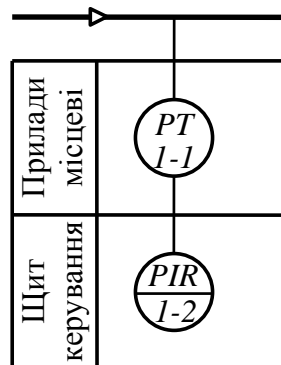
**Комплект технічних засобів:** *1-1* – перетворювач витрати електромагнітний (індукційний) ПРЕМ-2 (вихідний інтерфейс RS-485); *1-2* – індикатор технологічний мікропроцесорний ІТМ-11В.

**Приклад 1.3. Контроль витрати та кількості рідини у технологічному потоці**



**Комплект технічних засобів:** *1-1* – ротаметр електричний РЕД з диференціально-трансформаторною системою передавання вимірювальної інформації; *1-2* – показувальний і реєструвальний прилад серії КСД2-054 з квадратичною характеристикою шкали та вмонтованим інтегровальним пристроєм.

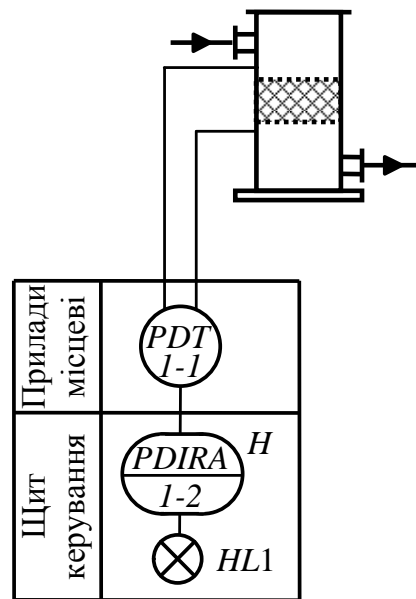
**Приклад 1.4. Контроль тиску газу в технологічному трубопроводі**



**Комплект технічних засобів:** *1-1* – вимірювальний тензоперетворювач тиску МТ100Р; *1-2* – вторинний показувальний і реєструвальний прилад ДИСК-250ТН.

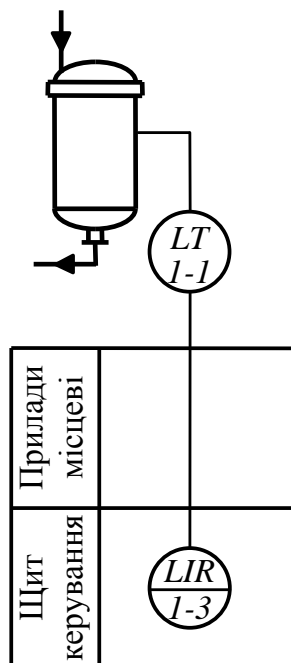


*Приклад 1.5. Контроль перепаду тиску на фільтрі з сигналізацією*



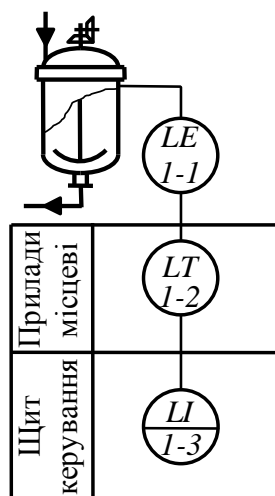
**Комплект технічних засобів:** 1-1 – вимірювальний перетворювач різниці тисків серії КВАНТ; 1-2 – вторинний показувальний і реєструвальний прилад РМТ 49D/1 (аналого-цифровий одноканальний, з індикацією на цифровому табло, безперервним записом вимірюваного параметра на діаграмній стрічці та пристроєм сигналізації).

*Приклад 1.6. Контроль рівня рідини в технологічному апараті*



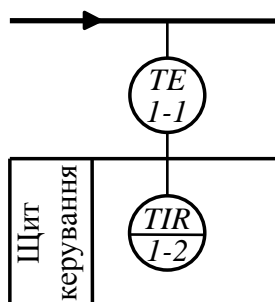
**Комплект технічних засобів:**  
 – на базі пневматичних ТЗА: 1-1 – вимірювальний пневматичний перетворювач рівня УБ-ПВ; 1-2 – пневматичний показувальний і реєструвальний прилад ПКР.1;  
 – на базі електричних ТЗА: 1-1 – датчик безконтактного радарного рівнеміра (серія 5600, УЛМ, ВМ-70 тощо); 1-2 – показувальний і реєструвальний прилад А100-Н.

**Приклад 1.7. Контроль рівня рідини в технологічному апараті з мішалкою**



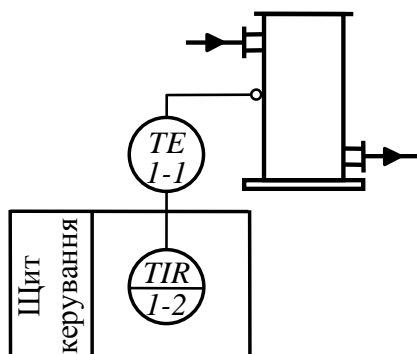
**Комплект технічних засобів:** 1-1, 1-2 – первинний АП-91 і проміжний ППИ-5Н вимірювальні перетворювачі акустичного рівнеміра ЭХО-5Н; 1-3 – прилад вторинний показувальний вузькопрофільний (щитовий) М1830.

**Приклад 1.8. Контроль температури рідини в технологічному трубопроводі**



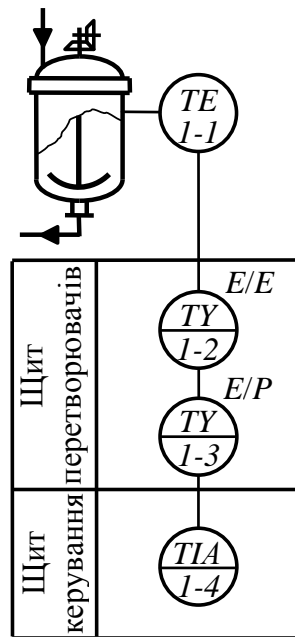
**Комплект технічних засобів:** 1-1 – термоелектричний перетворювач з номінальною статичною характеристикою (НСХ)  $B$ ,  $L$ ,  $K$  тощо або термоперетворювач опору платиновий (ТОП) чи мідний (ТОМ) градування 50П, 50М, 100П, 100М тощо; 1-2 – прилад вторинний показувальний і реєструвальний РР-160.

**Приклад 1.9. Контроль температури поверхні технологічного апарата**



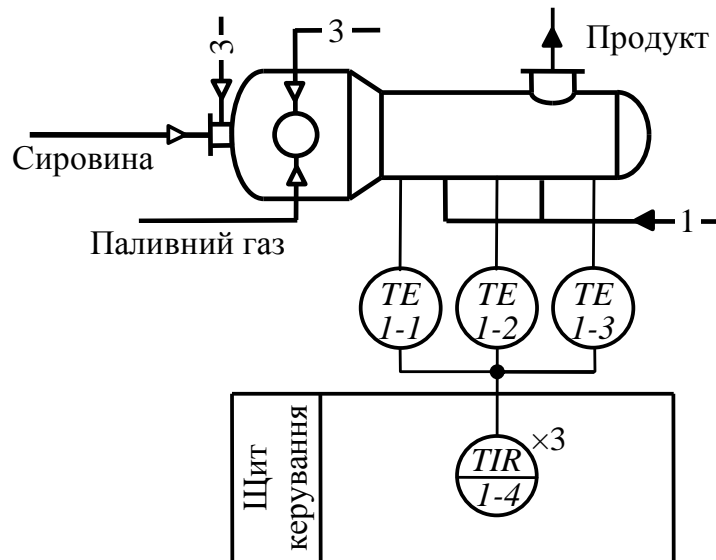
**Комплект технічних засобів:** 1-1 – термоелектричний перетворювач поверхневий ТХКП-ХVІІІ (НСХ  $L$ ); 1-2 – вторинний показувальний і реєструвальний прилад РМТ 39D/1 (аналого-цифровий з точковим записом вимірюваного параметра).

Приклад 1.10. Контроль температури реакційної маси в апараті



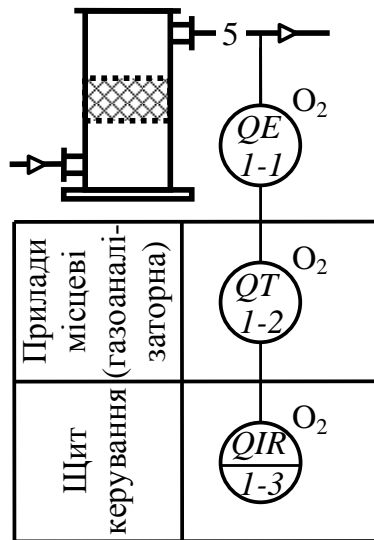
**Комплект технічних засобів:** 1-1 – термоелектричний перетворювач ТХА-1087 (НСХ К); 1-2 – нормувальний перетворювач Ш 78 (або Ш 79, П 282, П 292, БПТ-22 тощо); 1-3 – електропневматичний перетворювач МТМ 810; 1-4 – прилад вторинний пневматичний показувальний із пневмосигналізацією ПКП.1П.

Приклад 1.11. Контроль профілю температур у технологічному апараті (циклонному реакторі для виробництва технічного вуглецю)



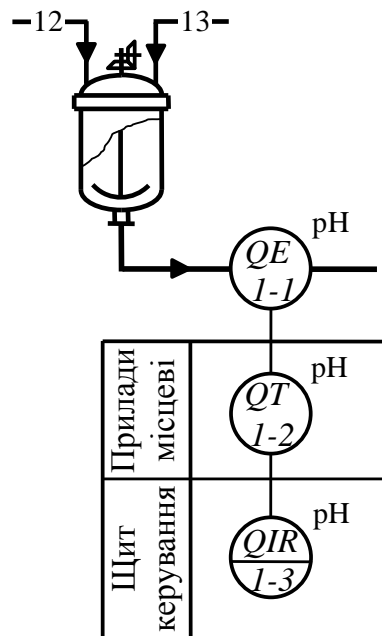
**Комплект технічних засобів:** 1-1, 1-2, 1-3 – термоелектричні перетворювачі з НСХ В, L, К тощо або термоперетворювачі опору ТОП чи ТОМ градування 50П, 50М тощо; 1-4 – багатоканальний (3 або 6 каналів) аналоговий реєстратор АЛЬФА-ЛОГ-100М, вхідні сигнали: 0...10 мВ, 0...100 мВ, 0...1 В, 0...5 мА, 4...20 мА; НСХ перетворювачів: термоелектричних – В, К, L, S, А-1, опору – 50П, 100П, 50М, 100М.

Приклад 1.12. Контроль концентрації кисню на виході технологічного апарата



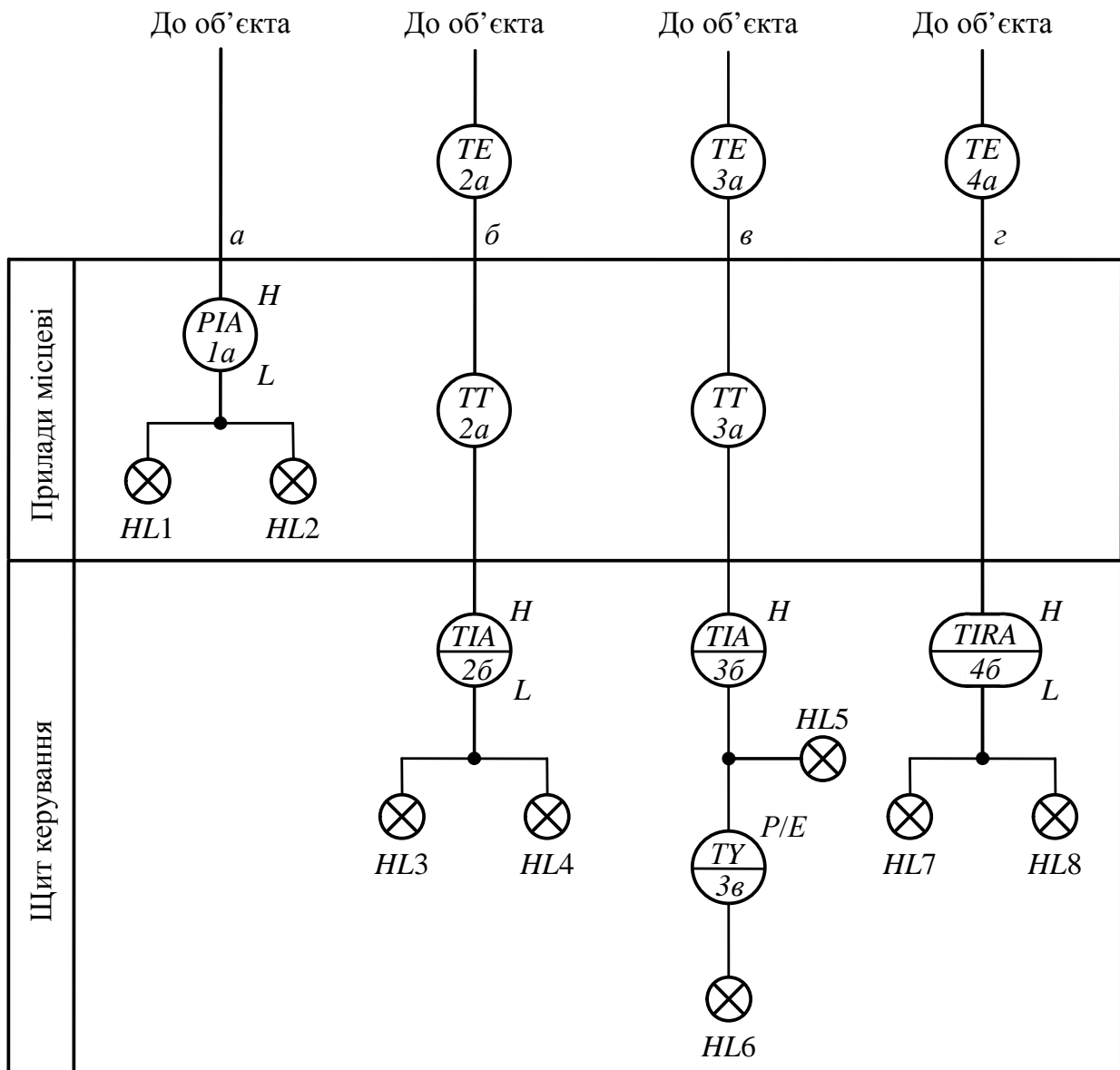
**Комплект технічних засобів:** *1-1* – первинний перетворювач ПП-16 термомагнітного газоаналізатора ГТМК-18; *1-2* – проміжний вимірювальний перетворювач ПРП термомагнітного газоаналізатора ГТМК-18 (вихідні сигнали: 0...10 мВ, 0...100 мВ, 0...1 В; 0...5 мА, 4...20 мА); *1-3* – електронний показувальний і реєструвальний прилад РП-160АД.

Приклад 1.13. Контроль рН розчину в технологічному трубопроводі



**Комплект технічних засобів:** *1-1* – чутливий елемент рН-метра магістрального виконання ДМ-5М (для контролю рН в апараті застосовують чутливі елементи заглибного виконання ДПг-4М) з електродами скляними ЭСП-31-06 і регулятором тиску РДС-1; *1-2* – перетворювач високоомний П-215М з цифровою індикацією результатів і пристроєм зв'язку з комп'ютером; *1-3* – показувальний і реєструвальний прилад А543.

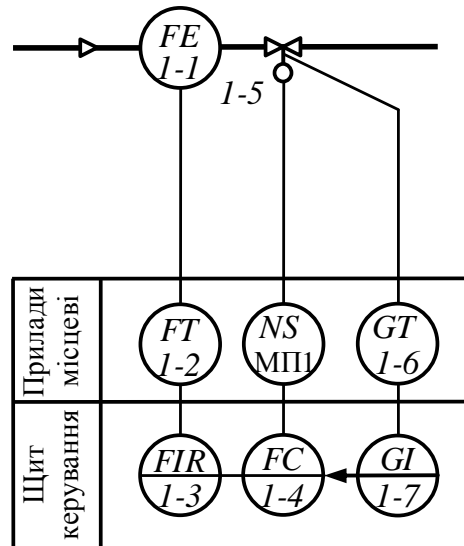
Приклад 1.14. Схеми контролю з технологічною сигналізацією



**Комплект технічних засобів:** *a* – схема з місцевою сигналізацією; *б–г* – схеми сигналізації на щиті керування; *1a, 2б* – електроконтактні манометри (останній використано як вторинний прилад у схемі манометричного термометра); *HL1...HL4, HL6...HL8* – лампи електричні сигнальні; *HL5* – лампа пневматична сигнальна; *2a, 3a* – манометричні термометри (термобалон і проміжний перетворювач – пристрій дистанційного передавання сигналу, наприклад, безшкальний пневматичний дифманометр 13ДД11); *3б* – пневматичний показувальний вторинний прилад ПКП.1П з пневматичною сигналізацією граничнодопустимих значень (здіяно сигналізацію тільки верхнього значення); *3в* – пневмоелектричний перетворювач ПЕП-11; *4a* – термоелектричний перетворювач (НСХ *B, L, K* тощо) або термперетворювач опору (ТОП чи ТОМ градуювання 50П, 100П, 50М, 100М); *4б* – відповідний вторинний реєструвальний (паперовий або безпаперовий) прилад (серій ДИСК-250, РМТ, КС2, МТМ-РЕ-160, Мемограф-М тощо), оснащений пристроєм сигналізації.

## СХЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Приклад 2.1. Одноконтурна стабілізувальна САР витрати газу

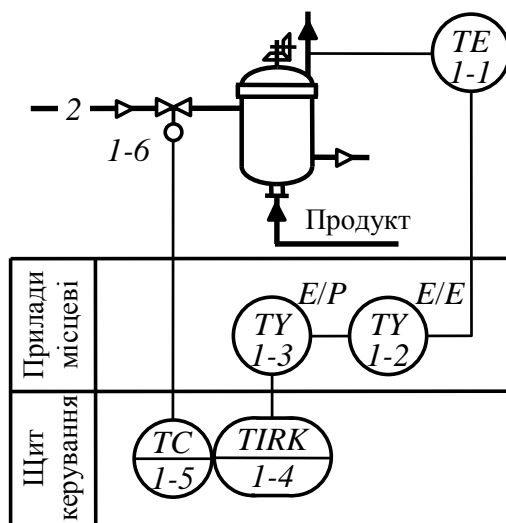


**Комплект технічних засобів:** 1-1 – звужувальний пристрій: діафрагма камерна ДКС6-200 (умовний тиск  $P_y$  до 6 МПа, внутрішній діаметр трубопроводу  $D_{тр} = 200$  мм); 1-2 – вимірювальний тензоперетворювач різниці тисків САФІР мод. 2464 з квадратичною функцією перетворення; 1-3 – показувальний і реєструвальний прилад ДИСК-250ДД; 1-4 – мікропроцесорний регулятор МІК-21 (реалізує дво- та трипозиційне регулювання, а також пропорційний (П), пропорційно-інтегральний (ПІ), пропорційно-диференціальний (ПД) та пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) алгоритми регулювання з імпульсним або аналоговим виходами)<sup>4</sup>; МПІ – пускач магнітний безконтактний реверсивний ПБР-2М; 1-5 – електричний виконавчий механізм однообертвий типу МЕО на основі самогальмівного однофазного електродвигуна з фазозрушувальним конденсатором, наприклад МЕО 6,3/10-0,25 (6,3 – номінальне значення навантаження на вихідному органі, Н · м; 10 – номінальне значення часу повного ходу вихідного органа, с; 0,25 – номінальне значення ходу вихідного органа, оберти); 1-6, 1-7 – дистанційний вказівник положення регульовального органа типу ДУП-М, ППМ-1 тощо (також формує для регулятора сигнал зворотного зв'язку за положенням регульовального органа<sup>5</sup>).

<sup>4</sup> Якщо в складі регулятора немає потужних (тиристорних) реверсивних підсилювачів для керування одно- чи трифазними електродвигунами, до складу САР додатково вводять тиристорні реверсивні підсилювачі типу У300, У330 та інші для керування однофазними електродвигунами, У24 – для керування трифазними або відповідні пускові пристрої (контактори чи магнітні пускачі – контактні типу ПМЕ, МКР, безконтактні типу ПБР тощо). Виробляються також тиристорні підсилювачі потужності (твердотільні реле) типу УМ, що застосовуються для регулювання та комутації змінного струму в різноманітних силових електричних установках і системах автоматики. Це проміжні пристрої між малопотужними вихідними пристроями регулятора й потужними активними навантаженнями: ТЕНами, електроприводами клапанів, обмотками електродвигунів тощо.

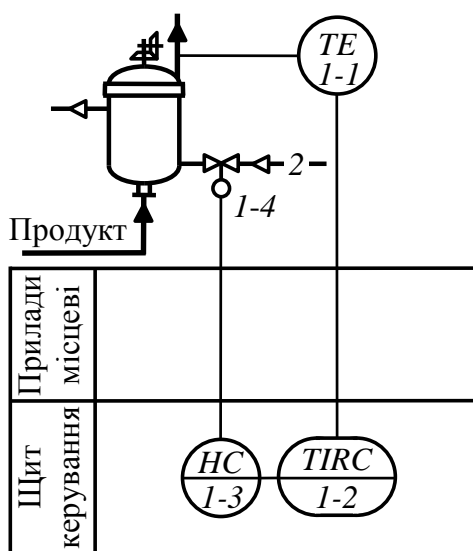
<sup>5</sup> Більш потужні МЕО (модифікації МЕО 16 і більше) оснащені вбудованими блоками сигналізації положення вихідного органа виконавчого механізму – реостатними (БСПР), індуктивними (БСПІ), струмовими (БСПТ). Для перетворення сигналів БСПР і БСПІ в уніфіковані можна скористатися перетворювачем положення механізму ППМ-1 (виробник «Підприємство «Мікрол»», м. Івано-Франківськ).

**Приклад 2.2. Одноконтурна стабілізувальна САР температури  
(з використанням станції керування)**



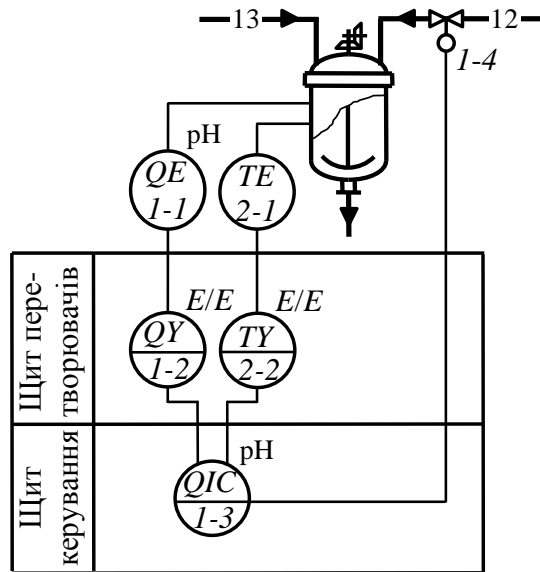
**Комплект технічних засобів:** *1-1* – термоелектричний перетворювач з НСХ *B, L, K* тощо або термоперетворювач опору ТОП чи ТОМ градування 50П, 50М тощо; *1-2* – нормувальний перетворювач П 282Б або П 282В; *1-3* – електропневматичний перетворювач ПЕП-95; *1-4* – пневматичний показувальний і реєструвальний прилад ФК0071 (система СТАРТ) зі станцією керування; *1-5* – регулятор пневматичний пропорційно-інтегрально-диференціальний ФР0095 (система СТАРТ); *1-6* – виконавчий механізм мембранний пневматичний прямохідний МИМ ППХ 01 з боковим дублером.

**Приклад 2.3. Одноконтурна стабілізувальна САР температури  
(з використанням панелі керування)**



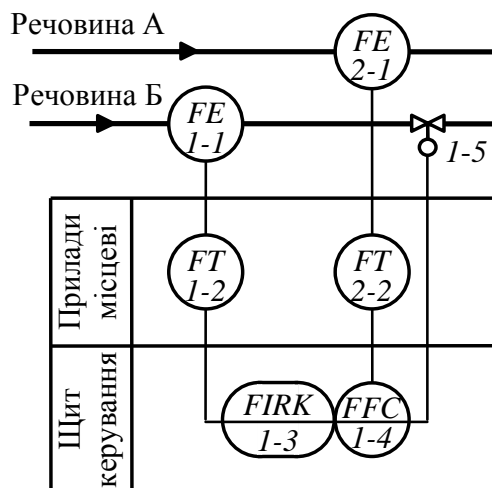
**Комплект технічних засобів:** *1-1* – термоелектричний перетворювач з НСХ *B, L, K* тощо або термоперетворювач опору ТОП чи ТОМ градування 50П, 50М тощо; *1-2* – показувальний і реєструвальний прилад ДИСК-250И із вбудовним пропорційно-інтегральним регулювальним пристроєм з пневматичним вихідним сигналом 0,02...0,1 МПа; *1-3* – пневматична панель керування ДПУ.1; *1-4* – пневмодвигун поворотний ППР.

**Приклад 2.4. Одноконтурна стабілізуюча САР значення рН в апараті з корекцією за температурою**



**Комплект технічних засобів:** 1-1 – чутливий елемент рН-метра заглибного виконання ДПг-4М; 1-2 – нормувальний перетворювач (нормалізатор) рН-метра ПП-10-1; 1-3 – мікропроцесорний регулятор ПП-10-2 (реалізує дво- та трипозиційне регулювання, а також П-, ІІ- та ПІД-алгоритми (імпульсні) регулювання, формує вихідний імпульсний сигнал керування зовнішнім інтегральним виконавчим механізмом); 1-4 – універсальний дистанційно керований (імпульсне керування, широтно-імпульсна модуляція (ШІМ)) електропривід СТЕП-Р; 2-1 – термоелектричний перетворювач з НСХ В, L, К тощо або термоперетворювач опору ТОП чи ТОМ градування 50П, 50М тощо; 2-2 – нормувальний перетворювач БПТ-22 або БПО-42.

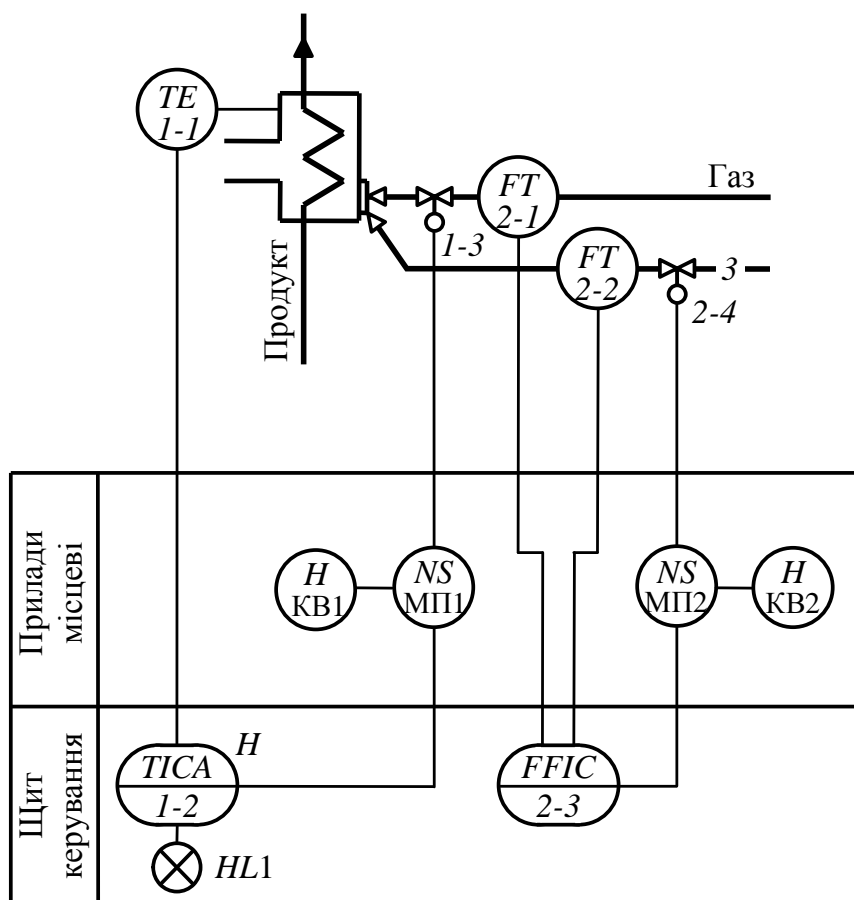
**Приклад 2.5. Слідкувальна САР співвідношення витрат**



**Комплект технічних засобів:** 1-1, 2-1 – звужувальні пристрої (труби Вентурі); 1-2, 2-2 – пневматичні передавальні перетворювачі перепаду тиску 13ДД11 із квадратичною функцією перетворення; 1-3 – пневматичний показувальний і реєструвальний прилад ФК0071 зі станцією керування; 1-4 – регулятор пневматичний пропорційно-інтегральний співвідношення ПР3.33-М1 (система СТАРТ); 1-5 – виконавчий механізм пневматичний мембранний прямохідний МИМП ППХ 05В з позиціонером ПП-1.25 і верхнім дублером.



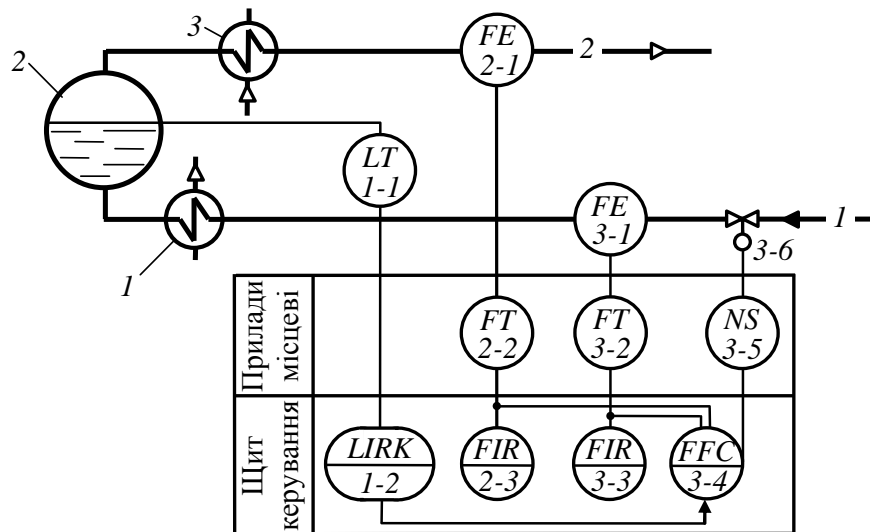
Приклад 2.6. Система автоматичного регулювання температури в печі та стабілізації співвідношення витрат газ : повітря



**Комплект технічних засобів:** 1-1 – термоелектричний перетворювач з НСХ *B, L, K* тощо або термоперетворювач опору ТОП чи ТОМ градуювання 50П, 50М тощо; 1-2 – мікропроцесорний регулятор МІК-21 (забезпечує цифрову індикацію та сигналізацію, реалізує дво- та трипозиційне регулювання, а також П-, ПІ-, ПД- та ПІД-алгоритми регулювання з імпульсним або аналоговим виходами; здійснює моніторинг справності датчиків; має гальванічно розділений інтерфейс RS-485 (протокол *Modbus*)); KB1, KB2 – кнопки запобіжного вимикання магнітних пускачів КМЕ-5111 УЗ; МП1, МП2 – пускач магнітний безконтактний реверсивний ПБР-3М; 2-1, 2-2 – вихрові електромагнітні перетворювачі витрати газів (Метран-331, Метран-332, ВЕПС тощо); 1-3, 2-4 – електричні виконавчі механізми багатообертові МЕМ з трифазним асинхронним електродвигуном, оснащені вбудованими блоками сигналізації положення вихідного органа виконавчого механізму – реостатними (БСПР), індуктивними (БСПІ), струмовими (БСПТ) (на схемі не показано)<sup>6</sup> та блоками кінцевих вимикачів (БКВ); 2-3 – мікропроцесорний регулятор співвідношення МІК-25 із внутрішнім зворотним зв'язком за положенням вихідного органа виконавчого механізму (забезпечує цифрову індикацію та сигналізацію, реалізує П-, ПІ-, ПД- та ПІД-алгоритми регулювання з імпульсним або аналоговим виходами).

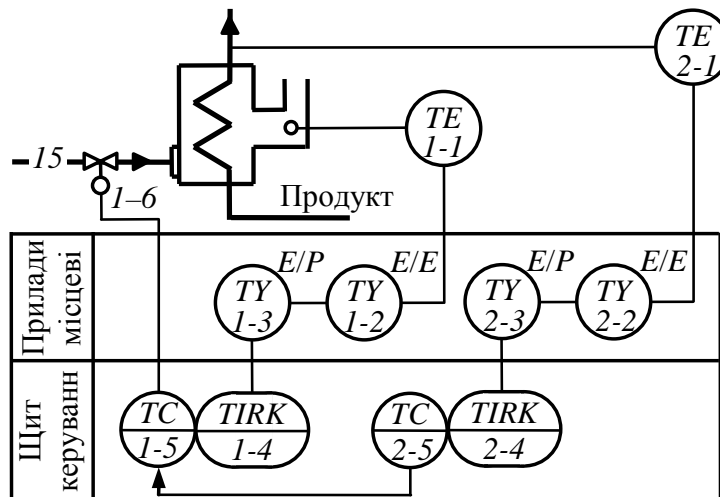
<sup>6</sup> Завдяки оснащенню багатообертових виконавчих механізмів типу МЕМ вбудованими датчиками зворотного зв'язку за положенням вихідного органа вони можуть бути застосовані в автоматичних системах для реалізації П-, ПІ-, ПД- та ПІД-алгоритма регулювання (решта багатообертових виконавчих механізмів є пристроями позиційної дії).

**Приклад 2.7. Система автоматичного регулювання співвідношення витрат вода : пара з корекцією за рівнем води у барабані парогенератора**



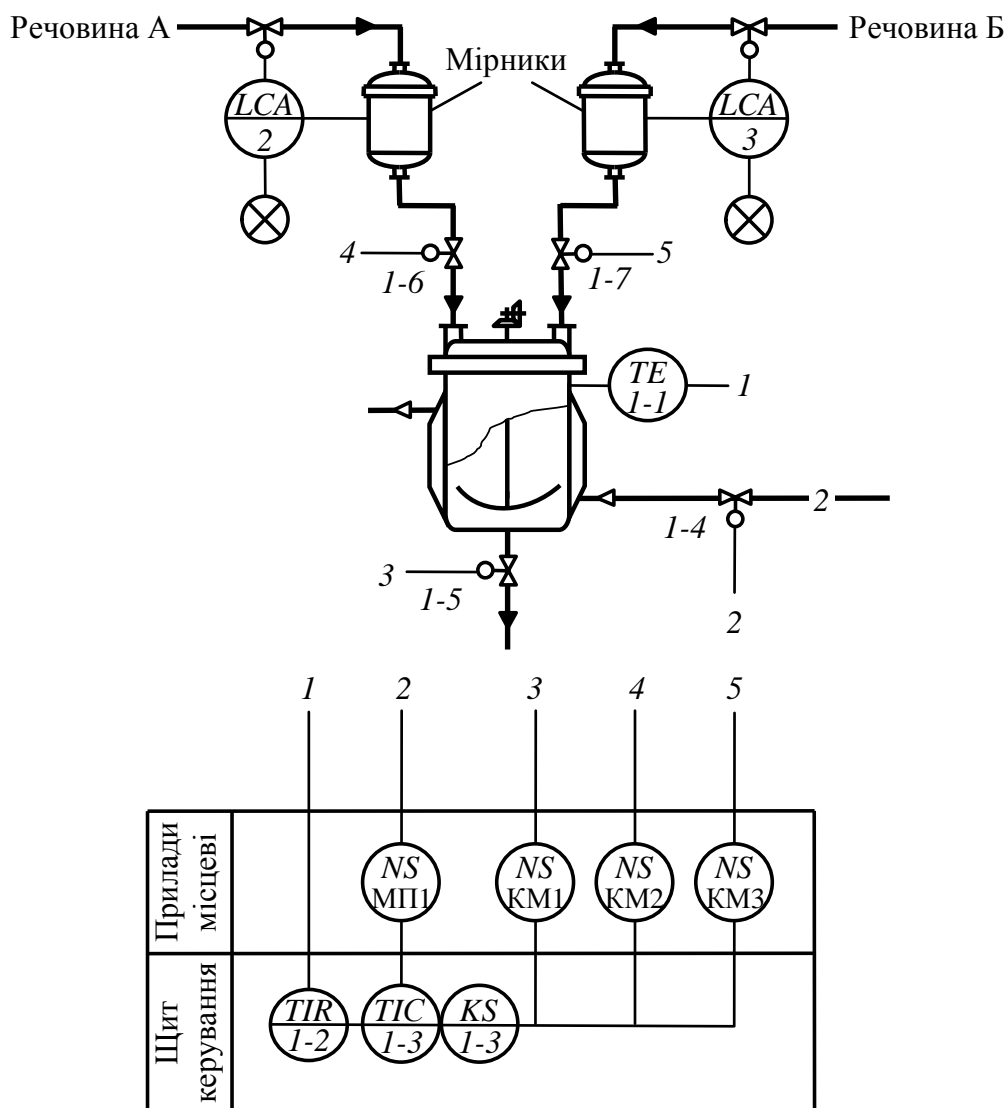
**Комплект технічних засобів:** 1-1 – дифманометр САФІР з лінійною функцією перетворення (додатково використовують стандартні зрівняльні посудини – на схемі не показано); 2-1, 3-1 – звужувальні пристрої (стандартні); 2-2, 3-2 – електричні передавальні перетворювачі перепаду тиску (дифманометри) типу ДМЕР, ДМ, САФІР тощо з квадратичною функцією перетворення; 1-2, 2-3, 3-3 – показувальні та реєструвальні прилади ДИСК-250; 3-4 – мікропроцесорний регулятор співвідношення МІК-25 з корекцією за третім параметром; 3-5 – тиристорний реверсивний підсилювач потужності У300; 3-6 – електричний виконавчий механізм однообертовий типу МЕО; 1 – нагрівник води; 2 – барабан парогенератора; 3 – перегрівник пари.

**Приклад 2.8. Система каскадно-зв'язаного регулювання температури**



**Комплект технічних засобів:** 1-1, 2-1 – термоелектричний перетворювач з НСХ В, L, К тощо або термоперетворювач опору ТОП чи ТОМ градування 50П, 50М тощо; 1-2, 2-2 – нормувальні перетворювачі Ш 79; 1-3, 2-3 – електропневматичні перетворювачі ПЕП-95 або багатоканальний електропневматичний перетворювач типу АСТРА-8М; 1-4, 2-4 – пневматичні показувальні та реєструвальні прилади ФК0071 зі станціями керування; 1-5, 2-5 – регулятори пневматичні пропорційно-інтегральні ФР0091 (допоміжний регулятор 2-5 формує завдання головному регулятору 1-5); 1-6 – пневмодвигун поворотний ППР-3-9, оснащений позиціонером пневматичним двобічної дії.

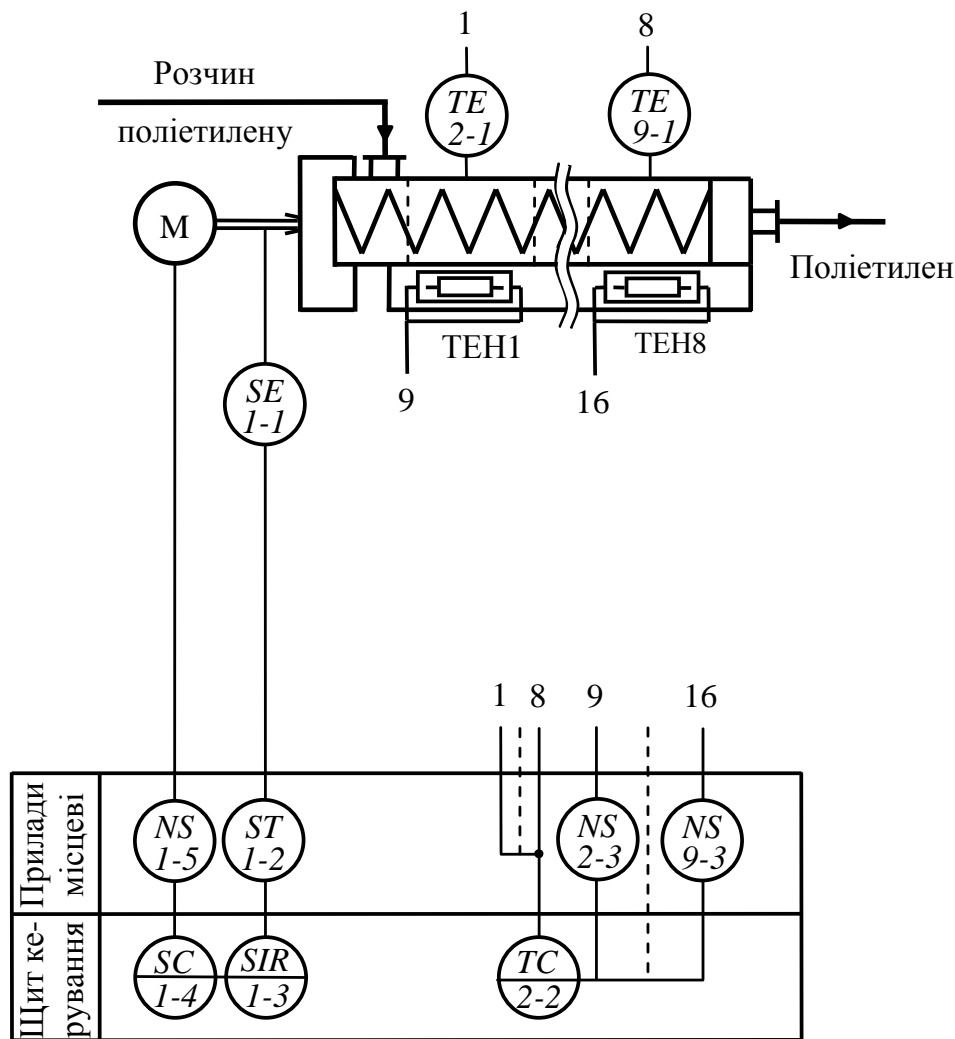
Приклад 2.9. Система програмного керування циклічним (періодичним) технологічним процесом<sup>7</sup>



**Комплект технічних засобів:** 1-1 – термоелектричний перетворювач з НСХ В, L, К тощо або термоперетворювач опору ТОП чи ТОМ градування 50П, 50М тощо; 1-2 – вторинний показувальний та реєструвальний прилад ДИСК-250; 1-3 – малоканалний багатфункціональний мікропроцесорний контролер МІК-51 (дозволяє вести локальне, каскадне, програмне, супервізорне, багатозв’язне регулювання; логічні функціональні блоки формують логічну програму крокового керування з аналізом умов виконання кожного кроку, заданням контрольного часу на кожному кроці й умовним або безумовним переходом програми до заданого кроку; забезпечує цифрову індикацію та сигналізацію); МП1 – пускач магнітний безконтактний реверсивний ПМЛ-3611Д з тепловим реле та ступенем захисту IP54; 1-4 – електричний виконавчий механізм однообертний типу МЕО; КМ1–КМ3 – контактори малогабаритні КМІ-10910; 1-5–1-7 – клапани запірні малогабаритні соленоїдні серії ЗСК; 2, 3 – датчикиреле рівня емнісні РДЕ-01-2112 (для сигналізації про ступінь заповнення апарата можна використати радіоізотопний перетворювач РП-24, похибка визначення заповнення – 3 %).

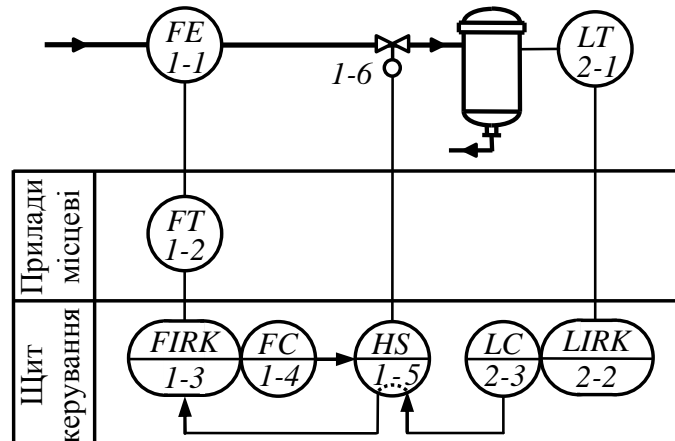
<sup>7</sup> Застосовано комбінований спосіб виконання схем автоматизації (прим. авт.).

Приклад 2.10. Система керування багатозонним шнековим екструдером



**Комплект технічних засобів:** 1-1, 1-2 – первинний Г-113 і проміжний Р-1813 перетворювачі електронного дистанційного тахометра типу К-1803; 1-3 – вторинний показувальний і реєструвальний прилад (реєстратор) Екограф; 1-4 – мікропроцесорний регулятор МІК-2; 1-5 – трипозиційний підсилювач потужності У24; 2-1...9-1 – термоперетворювачі опору ТОП або ТОМ градування 50П, 50М тощо; 2-2 – восьми-канальний мікропроцесорний двопозиційний терморегулятор МТР-8, дозволяє підключати ТОП (НСХ 50П і 100П), ТОМ (НСХ 50М і 100М) і ТП (НСХ L, K, B, A, J, E) за три- або чотириввідними схемами (у разі потреби використання аналогових регуляторів можна застосувати восьмиканальний мікропроцесорний регулятор МТР-44, який працює з вихідними сигналами ТОП, ТОМ, ТП та датчиків, що мають уніфікований вихідний сигнал постійного струму або напруги, і забезпечує дво-, трипозиційне, ПІД-імпульсне та ПІД-широтноімпульсне регулювання, а також за комбінацією – ТА/АБО – часу та контрольованого параметра); 2-3...9-3 – підсилювач потужності аналоговий У13Н (призначений для керування потужністю електронагрівників і забезпечує лінійне перетворення вхідного сигналу постійного струму 0...5 мА чи постійної напруги 0...10 В у вихідну потужність у режимі фазоімпульсного керування); ТЕН1–ТЕН8 – електронагрівники трубчасті.

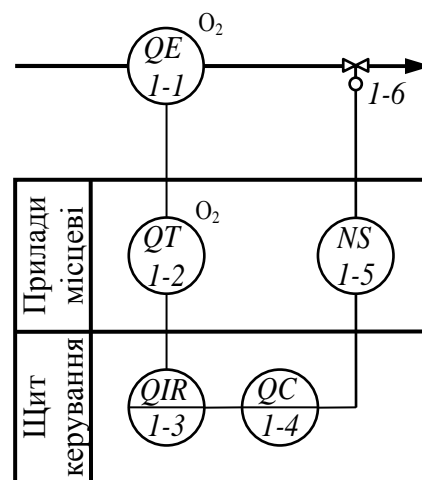
**Приклад 2.11. Система каскадно-зв'язаного регулювання рівня рідини (регулювання витрати рідини з коригуванням за рівнем)**



**Комплект технічних засобів:** 1-1 – діафрагма камерна ДКС0,6-150; 1-2 – пневматичний передавальний перетворювач перепаду тиску 13ДД11 із квадратичною функцією перетворення; 1-3, 2-2 – вторинні пневматичні показувальні та реєструвальні прилади ФК0071 зі станціями керування; 1-4, 2-3 – регулятори пневматичні пропорційно-інтегральні ФР0091 (система СТАРТ); 1-5 – перемикач пневматичних каналів ПМТ-4; 1-6 – мембранний пневмопривід МП-150; 2-1 – буйковий рівнемір УБ-П з пневматичним передавальним перетворювачем ( $P_{\text{вих}} = 0,02 \dots 0,1$  МПа).

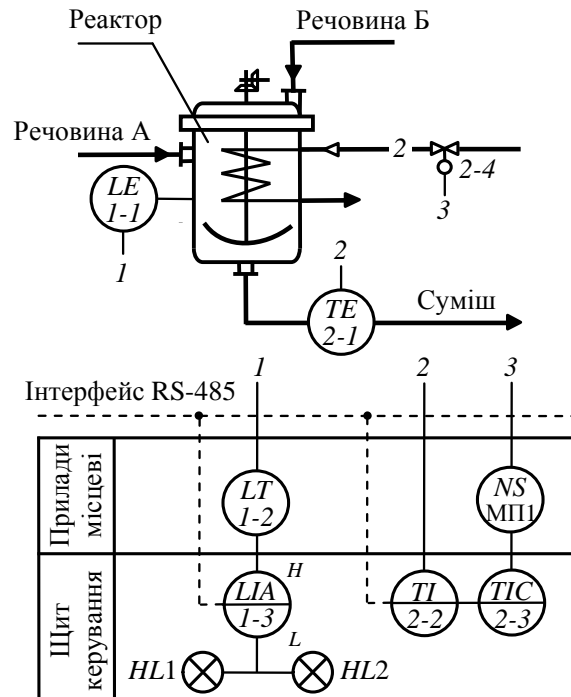
*Примітка.* Перемикач 1-5 забезпечує перехід до одноконтурного регулювання рівня. Для отримання схеми регулювання витрати без коригування за рівнем, а також для ручного регулювання витрати використовується станція керування у вторинному приладі 1-3 (при цьому перемикач 1-5 переводиться в положення одноконтурного регулювання).

**Приклад 2.12. Схема автоматизації процесу насичення живильної води парового котла киснем**



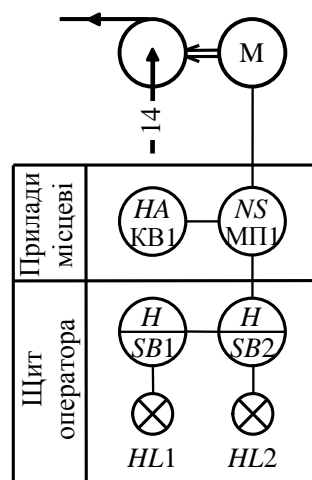
**Комплект технічних засобів:** 1-1, 1-2 – датчик аналізатора кисню АКПМ-01Л; 1-3 – прилад вторинний самописний (РП-160М); 1-4 – регулятор електронний пропорційно-інтегральний (РС29.3.42М); 1-5 – пристрій керування електроприводом (пускач магнітний реверсивний ПМЕ-151 або ПБР-2А, підсилювач тиристорний трипозиційний У24, У29.3М тощо); 1-6 – виконавчий механізм (електропривід типу МЕМ).

**Приклад 2.13. Система автоматичного регулювання (стабілізації) температури та сигналізації рівня рідини з використанням цифрових приладів**



**Комплект технічних засобів:** 1-1, 1-2 – радарний рівнемір УЛМ-11,  $I_{\text{вих}} = 4 \dots 20$  мА; 1-3, 2-2 – індикатор технологічний мікропроцесорний ІТМ-12 (два канали вимірювання, два дискретні виходи та один аналоговий; цифрова індикація, технологічна сигналізація min і max); 2-3 – мікропроцесорний регулятор МІК-21 (П-, ПІ-, ПД-, ПІД-ШІМ-регулятор, цифрова індикація); МП1 – пускач магнітний безконтактний реверсивний ПБР-2М; 2-4 – електричний виконавчий механізм однообертний типу МЕО.

**Приклад 2.14. Система керування роботою електроприводу (з двох постів)**



**Комплект технічних засобів:** SB1 – кнопка керування ХВ2-ВА31, зелена («ПУСК»); SB2 – кнопка керування ХВ2-ВА42, червона («СТОП»); KB1 – кнопка запобіжного відмикання КУ 121-2 з підсвічуванням; HL1 – лампа сигнальна світлодіодна із зеленим індикатором СКЛІ-11-3-2-220; HL2 – лампа сигнальна світлодіодна із червоним індикатором СКЛІ-11-К-2-220; МП1 – пускач магнітний неререверсивний ПМ12-160210 У2 з тепловим реле РТТ-326-160А.

## Специфікація устаткування, виробів і матеріалів (зразок)

Позиція на схемі	Назва параметра	Середовище, місце відбору інформації	Граничне значення параметра	Місце монтажу	Назва, технічна характеристика	Тип, марка моделі	Код	Завод-виробник	Кількість	Маса одиниці, кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
УСТАТКУВАННЯ ТА ПРИЛАДИ										
1-1, 17-1	Витрата	Пермеат, трубопровід	24,6 м <sup>3</sup> /год	Трубопровід	Діафрагма камерна, $P_y = 0,6$ МПа; $D_{тр} = 75$ мм	ДКС0,6-75	–	ВАТ «Промприлад», м. Івано-Франківськ	2 од.	11,2
1-2, 17-2	Те саме	Те саме	Те саме	Місцевий	Дифманометр безшкальний з квадратичною функцією перетворення; $\Delta P_{max} = 40$ кПа; клас точності 1; $P_{вих} = 20 \dots 100$ кПа	13ДД11 (мод. 720)	–	ВО «Теплоприбор», м. Рязань	2 од.	6,5
1-3, 17-3	– " –	– " –	– " –	Щит керування	Прилад вторинний пневматичний показувальний, реєструвальний (система СТАРТ) зі станцією керування; $P_{вх} = 20 \dots 100$ кПа, граничнодопустима основна похибка 0,5 %; $P_{живл} = 140$ кПа	ФК0071	–	АТ «ТИЗПРИБОР», м. Москва	2 од.	7,5
1-4, 12-5, 17-4	– " –	– " –	– " –	Щит керування	Регулятор пневматичний пропорційно-інтегральний (система СТАРТ); витрата повітря живлення 4,5 л/хв, граничнодопустима основна похибка 0,5 %; $P_{живл} = 140$ кПа, $P_{вих} = 20 \dots 100$ кПа	ФР0091	–	АТ «ТИЗПРИБОР», м. Москва	3 од.	2
1-5, 12-6, 17-5	– " –	– " –	– " –	Трубопровід 29	Механізм виконавчий пневматичний прямої дії з позиціонером ПП-1.25 і боковим дублером; $P_{живл} = 0,25$ МПа	МИМП ППХ 05	–	ВАТ «Прикарпат-промарматура», м. Івано-Франківськ	3 од.	33
6-1	Температура	Пермеат, трубопровід	140 °С	Трубопровід 29	Термоперетворювач опору мідний, НСХ 50М (100М), діапазон вимірювання: $-50 \dots 150$ °С, довжина монтажної частини 120...3150 мм; діаметр захисної арматури 10 мм; матеріал захисної арматури – сталь 12Х18Н10Т; умовний тиск $P_y = 6,3$ МПа; інерційність 20 с; клас допуску В	ТСМ-1188	–	НВО «Електротермія», м. Луцьк	1 од.	4

## Продовження додатка 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6-2	Те саме	Те саме	Те саме	Щит керування	Автоматичний показувальний і реєструвальний вторинний прилад; вхідні сигнали: 0...5 мА, 4...20 мА; НСХ перетворювачів: термоелектричних – В, К, L, S, опору – 50П, 100П, 50М, 100М	ДИСК-250	–	ЗАТ «Промышленная группа «Метран»», м. Челябинськ	1 од.	13
6-3	Те саме	Те саме	Те саме	Щит керування	Регулятор мікропроцесорний двоканальний з корекцію за другим параметром. Реалізує П-, ПІ- та ПІД-алгоритми регулювання з імпульсним або аналоговим виходами: 0...5 мА, 0(4)...20 мА, максимальні похибки: АЦП $\pm 0,2\%$ , ЦАП $\pm 0,5\%$	МІК-21	–	ВАТ «Підприємство «МІКРОЛ»», м. Івано-Франківськ	1 од.	1,1
7-1	Перепад тиску	Пермеат, вугільний фільтр	30 кПа	Місцевий	Тензодатчик різниці тисків мікропроцесорний, $\Delta P_{\max} = 1,6$ МПа, температура 5...50 °С,; клас точності 0,25; $I_{\text{вих}} = 0...5$ (4...20) мА	«Сафір М» мод. 5440	–	ЗАТ «Манометр», м. Харків	2 од.	4,4
11-1	Перепад тиску	Вода, мембранний апарат	50 кПа							
7-2, 11-2	Те саме	Те саме	Те саме	Щит керування	Індикатор технологічний мікропроцесорний одноканальний; вхідні сигнали: 0...75 мВ, 0...200 мВ, 0...2 В, 0...10 В, 0...5 мА, 4...20 мА; виходи: 1 аналоговий і 2 дискретні; НСХ перетворювачів: термоелектричних – А-1, В, К, L, S, опору – 50П, 100П, 50М, 100М; допустима зведена похибка 0,2%; RS-232; цифрова індикація	ІТМ-20У	–	ВАТ «Підприємство «МІКРОЛ»», м. Івано-Франківськ	2 од.	2,3
9-1, 10-1	Рівень	Пермеат, бак-збирач пермеату і реганту	3,5 м	Апарати 4, 6	Рівнемір буйковий з пневматичним передавальним перетворювачем, $L_{\max} = 4$ м, $p_{\text{доп}} = 4$ МПа, $P_{\text{вих}} = 20...100$ кПа	УБ-ПА	–	ВО «Теплоприбор», м. Рязань	2 комп.	40
12-1	pH	Водний розчин $\text{H}_2\text{NO}_3$ , мембранний апарат	4–6	Апарат 3	Чутливий елемент рН-метра заглибного (магістрального) виконання з електродами скляними ЭСП-01-14 і регулятором тиску РДС-1; глибина занурення 1600 мм	ДПГ-4М, тип ІV (ДМ-5М)	–	«Гомельский завод измерительных приборов», м. Гомель	1 од.	13
12-2	Те саме	Те саме	Те саме	Місцевий	Перетворювач високоомний; клас точності 1; $I_{\text{вих}} = 0...5$ мА; цифрова індикація; інтерфейс RS-232/485	П-215М	–	«Гомельский завод измерительных приборов», м. Гомель	1 од.	6



## Закінчення додатка 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12
6-4	Каламутність	Вода, трубопровід	1 мг/дм <sup>3</sup>	Байпас трубопр. 31	Механізм виконавчий електричний однообертовий: 6,3 – номінальний момент на вихідному валу, Н·м; 12,5 – час повного ходу вихідного валу, с; 0,25 – повний хід вихідного валу, об	МЭО-6,3/12,5-0,25-99	–	Севанський завод електричних виконавчих механізмів, м. Севан	1 од.	6,5
15-1	В'язкість	Олива моторна, трубопровід	7,5 Па·с	Трубопровід продукції	Віскозиметр вібраційний низькочастотний, діапазон вимірювання 1...100000 Па·с; гранично-допустима зведена похибка $\pm 2,5\%$ ; температура рідини мінус 60...200 °С; $I_{\text{вих}} = 4...20$ мА	ВВН-8	–	ТОВ «Автоматика», м. Воронеж	1 од.	8,5
17-2	Концентрація	NO <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , ТЕЦ-6	0,005	Місцевий	Газоаналітична система технологічного та екологічного моніторингу; діапазон вимірювання 0,0001...100 об. д. %, довжина пробовідбірника 200...3500 мм, температура вимірюваного газу до 1500 °С, довкілля – мінус 50...80 °С, вихідні сигнали: аналогові 0...5 мА, 4...20 мА; дискретні; цифрові – інтерфейс RS-485/232, Ethernet	КГО*	–	ФДУП «Смоленское ПО «Аналітприбор»», м. Смоленськ	1 комплект	-
18-2	–	–	–	Місцевий	Перетворювач пневмоелектричний, осн. похибка $\pm 0,25\%$ ; $P_{\text{вх}} = 20...100$ кПа; $I_{\text{вих}} = 0...5$ мА	ПЕП-11	–	ВАТ «Мікрол», м. Івано-Франківськ	1 од.	0,4
21-4	–	–	–	Щит керування	Перетворювач електропневматичний, осн. похибка $\pm 0,5\%$ ; $I_{\text{вх}} = 0...5$ мА; $p_{\text{вих}} = 20...100$ кПа	МТМ 810	–	НВП «Мікротерм», м. Сіверодонецьк	1 од.	1,5
ЕЛЕКТРОАПАРАТИ										
SB1	Витрата	Насоси Н-1, Н-2	80 м <sup>3</sup> /год	Щит керування	Пост керування кнопковий, кількість елементів керування – 2; $U_{\text{ном}} = 220$ (380) В, 50/60 Гц	ПКУ 15-21-131 У3	–	Трест «Променергоавтоматика», м. Київ	1 од.	0,27
KB1	–	–	–	–	Кнопка запобіжного відмикання; $I_{\text{ном}} = 10$ А	КМЕ-5111У	–	—	1 од.	0,21
МП1, МП2	–	–	–	Місцевий	Магнітний пускач безконтактний, реверсивний, для керування електричними ВМ з однофазними (трифазними) електродвигунами; керувальний сигнал $U_{\text{вх}} = 24 \pm 6$ В, $U_{\text{жив}} = 220$ (380) В, 50/60 Гц	ПБР-2М (ПБР-3М)	–	ВО «Електроприбор», м. Чебоксари	2 од.	3,5
HL1, HL2	–	–	–	–	Лампа сигнальна світлодіодна із зеленим індикатором («ПУСК»), $U_{\text{жив}} = 220$ В, 50/60 Гц	ЛС 47-1	–	«ІЕК Україна», м. Київ	2 од.	0,12
HL3, HL4	–	–	–	–	Лампа сигнальна світлодіодна з червоним індикатором («СТОП»), $U_{\text{жив}} = 220$ В, 50/60 Гц	ЛС 47-2	–	«ІЕК Україна», м. Київ	2 од.	0,12

\*Контрольовані параметри: N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, He, N<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, HF, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CH<sub>2</sub>O, Cl<sub>2</sub>, HCl, NH<sub>3</sub>, граничнодопустимі концентрації в повітрі робочої зони токсичних та забруднювальних речовин [вуглеводні, галоїди та їх похідні, пари різноманітних органічних сполук (спирти, розчинники, кетони, ароматичні вуглеводні, феноли, альдегіди, карбонові кислоти тощо)].

## Список використаної та рекомендованої літератури

1. **Архангельский В. И.** Интегрированные АСУ в промышленности [Текст] / В. И. Архангельский, И. Н. Богаенко, Н. А. Рюмин ; НПК «Киевский ин-т автоматизики». – К.: [б. в.], 1995. – 316 с. – ISBN 5-7707-8444-X.
2. **Бабіченко А. К.** Промислові засоби автоматизації [Текст] : навч. посіб.: У 2 ч. / А. К. Бабіченко, В. І. Тошинський, В. С. Михайлов та ін. ; За заг. ред. А. К. Бабіченка. – Х.: НТУ «ХП», 2003 р. – Ч. 2. Регульовальні і виконавчі пристрої. – 658 с. : іл. – Бібліогр.: с. 644–645. – 500 пр. – ISBN 966-593-292-6.
3. **Головко Д. Б.** Автоматика і автоматизація технологічних процесів [Текст] : підруч. для студ. вузів / Д. Б. Головко, К. Г. Рего, Ю. О. Скрипник. – К.: Либідь, 1997. – 232 с. : іл. – Бібліогр.: с. 228. – ISBN 5-325-00843-0.
4. **Денисенко В. В.** Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием [Текст]. – М.: Горячая линия-Телеком, 2009. – 608 с. : ил. – Библиогр.: с. 558–592. – Предм. указ.: с. 593–606. – 1000 экз. – ISBN 978-5-9912-0060-8.
5. **Дорф Р.** Современные системы управления [Текст] / Ричард Дорф, Роберт Бишоп ; перевод с англ. Б. И. Копылова. – М. : Лаборатория Базовых Знаний, 2004. – 832, [7] с. : ил. ; 24 см. – Библиогр.: с. 821–822. – Предм. указ. : с. 823–831. – 1000 экз. – ISBN 5-93208-119-8.
6. *ДСТУ Б А.2.4–3:2009.* Правила виконання робочої документації автоматизації технологічних процесів. – Чинний від 23.01.2009. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 54 с.
7. **Елизаров И. А.** Технические средства автоматизации. Программно-технические комплексы и контроллеры [Текст] : учеб. пособие / И. А. Елизаров, Ю. Ф. Мартемьянов, А. Г. Схиртладзе и др. – М.: «Издательство Машиностроение – 1», 2004. – 180 с. : ил. – Библиогр.: с. 178–179. – 100 экз. – ISBN 5-94275-104-8.
8. **Жученко А. І.** Система керування процесом випалювання цегли в тунельній печі [Текст] / А. І. Жученко, І. В. Ярошук // Автоматизація виробничих процесів. – 2003. – № 1 (16). – С. 32–37. – Бібліогр.: с. 37. – ISSN 1810-0752.
9. **Жученко А. И.** Компьютерные алгоритмы интегрирования дифференциальных уравнений и их систем [Текст] / А. И. Жученко, А. И. Кубрак. – К.: Изд-во ЧП ЭКМО, 2006. – 270 с. : ил. – Библиогр.: с. 269–270. – 200 экз.
10. **Зайцев В. Ф.** Теорія автоматичного управління [Текст] : підруч. для студ. вищих навч. закл. / В. Ф. Зайцев, В. К. Стеклов, О. І. Бріцький ; за ред. проф. Г. Ф. Зайцева. – К.: Техніка, 2002. – 688 с. – Бібліогр.: с. 673–676. – 1000 пр. – ISBN 966-575-044-5.
11. **Калениченко А. Ф.** Справочник инженера по контрольно-измерительным приборам и автоматике [Текст] : учеб.-практ. пособ. / А. Ф. Калениченко, Н. В. Уваров, В. В. Дойников ; Под ред. А. Ф. Калениченко. – М.: «Инфра-Инженерия», 2008. – 576 с. : ил. – Библиогр.: с. 551–553. – 2000 экз. – ISBN 978-5-9729-0017-6.
12. **Кваско М. З.** Числові методи комп'ютерного моделювання автоматичних систем. Алгоритми і програми [Текст] : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навч. за спец. «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / М. З. Кваско, А. І. Кубрак, А. І. Жученко ; Національний технічний ун-т України «Київський політехнічний ін-т». – К.: ІВЦ «Видавництво «Політехніка»», 2003. – 360 с. : рис. – Бібліогр.: с. 353–355. – ISBN 966-622-148-9.
13. **Кваско М. З.** Проектування і дослідження дискретних систем автоматичного керування технологічними процесами [Текст] : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом «Автоматизація і комп'ют.-інтегр. технології» / М. З. Кваско, М. С. Піргач, Т. В. Аверіна. – К.: ІВЦ «Видавництво «Політехніка»», 2003. – 360 с. : іл. – Бібліогр.: у кінці розд. – 200 пр. – ISBN 966-622-116-0.
14. **Ким Д. П.** Теория автоматического управления процессами [Текст] : В 2-х т. / Д. П. Ким. – Т. 1. Линейные системы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 288 с. : ил. – Библиогр.: с. 280–281. – ISBN 5-9221-0379-2.
15. **Кожухар В. Я.** Автоматичні системи керування хіміко-технологічними процесами [Текст] : навч. посіб. для студ. хім.-технол. спец. / В. Я. Кожухар, В. В. Брем, Ю. Ф. Каверін ; Одеський національний політехнічний ун-т. Хіміко-технологічний факультет. – О.: Екологія, 2005. – 224 с. : рис. – Бібліогр.: с. 221. – ISBN 966-8740-06-8.

16. **Кубрак А. И.** Определение передаточных функций элементов автоматических систем [Текст] : моногр. / А. И. Кубрак, А. И. Жученко. – К.: НТУУ «КПІ», 2006. – 261 с. : рис. – Библиогр.: с. 256–258. – 200 пр.
17. **Кубрак А. І.** Комп'ютерне моделювання та ідентифікація автоматичних систем [Текст] : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закладів, які навчаються за напрямом «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / А. І. Кубрак, А. І. Жученко, М. З. Кваско ; Національний технічний ун-т України «Київський політехнічний ін-т». – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2004. – 424 с. – Бібліогр.: с. 409–416. – ISBN 966-622-175-6.
18. **Лазарева Т. Я.** Основы теории автоматического управления [Текст] : Учеб. пособие. : 2-е изд., перераб. и доп. / Т. Я. Лазарева, Ю. Ф. Мартемьянов. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004 –352. : ил. – Библиогр.: с. 347–348. – 400 экз. – ISBN 5-8265-0149-9.
19. **Липатников Г. А.** Автоматическое регулирование объектов теплоэнергетики [Текст] : учеб. пособие для студ. теплоэнергетических спец. / Г. А. Липатников. – Владивосток: ДВПИ им. Куйбышева, 2007. – 144 с. : ил. – Библиогр.: с. 140–141.
20. **Лукінюк М. В.** Технологічні вимірювання та прилади [Текст] : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / М. В. Лукінюк ; Національний технічний ун-т України «Київський політехнічний ін-т». – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2007. – 436 с. : іл. – Бібліогр.: с. 427–428. – 200 пр. – ISBN 978-966-622-247-6.
21. **Лукінюк М. В.** Автоматизація типових технологічних процесів: технологічні об'єкти керування та схеми автоматизації [Текст] : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом «Автоматизація і комп'ют.-інтегр. технології» / М. В. Лукінюк ; Національний технічний ун-т України «Київський політехнічний ін-т». – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 236 с. : іл. – Бібліогр.: с. 230–231. – 200 пр. – ISBN 978-966-622-287-2.
22. Математические основы теории автоматического регулирования [Текст] : учеб. пособие.: в 2-х т. – 2-е изд., доп. / В. А. Иванов, В. С. Медведев, Б. К. Чемоданов и др. ; под ред. Б. К. Чемоданова. – М.: Высш. шк., 1977. – Т. 2. – 548 с. : ил. – Библиогр.: с. 446–447. – 20000 экз.
23. **Остапенко Ю. О.** Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів керування [Текст] : Підруч. для студ. вищих закл. освіти за напрямом «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». – К.: Задруга, 1999. – 424 с. : іл. – Бібліогр.: у кінці розд. – 1000 пр. – ISBN 966-7405-36-2.
24. **Попович М. Г.** Теорія автоматичного керування [Текст] : підруч. для студ. вищ. техн. навч. закл. – 2-ге вид., перероб. і доп. / М. Г. Попович, О. В. Ковальчук. – К.: Либідь, 2007. – 656 с. – Бібліогр.: с. 650–651. – 540 пр. – ISBN 978-966-06-0447-6.
25. **Потрашков В. И.** Автоматизация технологических процессов химической промышленности [Текст] : учеб. пособие / В. И. Потрашков ; Украинская инженерно-педагогическая академия. – К.: [б.в.], 1996. – 144 с. : ил. – ISBN 5-7763-9471-6.
26. **Соколов Р. С.** Химическая технология [Текст] : учеб. пособие для студ. вузов: В 2 т. / Р. С. Соколов. – М.: Гуманит. изд-во «Центр ВЛАДОС», 2000. – Т. 1. – 368 с. : ил. – Библиогр.: с. 363–364. – 5000. – ISBN 5-691-00355-0.
27. **Стеклов В. К.** Проектування систем автоматичного керування [Текст] : навч. посіб. / В. К. Стеклов. – К.: Вищ. шк., 1995. – 231 с. : іл. – Бібліогр.: с. 229–230. – ISBN 5-11-003905-4.
28. Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод [Текст]: підруч. для студ. хіміко-технолог. і еколог. спец. вузів / А. К. Запольський, Н. А. Мішкова-Кліменко, І. М. Астрелін та ін. ; за ред. А. К. Запольського. – К.: Лібра, 2000. – 552 с. – Бібліогр.: в кінці розділів. – 4000. – ISBN 966-7035-28-X.
29. **Шандров Б. В.** Технические средства автоматизации [Текст] : учеб. для студ. высш. учеб. заведений / Б. В. Шандров, А. Д. Чудаков. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 368 с. – Библиогр.: с. 358. – 3000 экз. – ISBN 978-5-7695-3624-3.
30. **Шувалов В. В.** Автоматизация производственных процессов в химической промышленности [Текст] : учеб. для сред. спец. учеб. заведений по спец. «Эксплуатация автомат. устройств хим. пр-в» / В. В. Шувалов, Г. А. Огаджанов, В. А. Голубятников. – М.: Химия, 1991. – 480 с. – Библиогр.: с. 479. – 10400 экз. – ISBN 5-7245-0142-2.
31. **Яворський В. Т.** Загальна хімічна технологія [Текст] : підруч. / В. Т. Яворський, Т. В. Перекупко, З. О. Знак та ін. – 2 вид. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2009. – 552 с. : іл. – Бібліогр.: с. 551. – 300 пр. – ISBN 978-966-553-822-6.

## ЗМІСТ

Список скорочень і літерних позначень .....	3
Передмова .....	5
<b>1. ОСНОВИ ТЕОРІЇ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ</b>	
1.1. Способи задавання властивостей елементів систем керування та систем в цілому .....	7
1.2. Класифікація елементів систем керування за їх динамічними властивостями .....	13
1.3. Диференціальні рівняння та передавальні функції груп детектувальних елементів .....	22
1.4. Об'єкти керування .....	26
1.4.1. Класифікація об'єктів керування.....	26
1.4.2. Канали впливу .....	27
1.4.3. Математичне моделювання статички об'єктів керування .....	28
<i>Аналітичний метод отримання статичних характеристик.....</i>	29
<i>Припущення аналітичного моделювання.....</i>	31
<i>Експериментальні методи отримання статичних характеристик.....</i>	33
<i>Апроксимація статичних характеристик .....</i>	34
1.4.4. Математичне моделювання динаміки об'єктів керування.....	35
<i>Динамічний режим та динамічні характеристики об'єктів керування .....</i>	35
<i>Основні динамічні властивості об'єктів керування .....</i>	36
<i>Методи отримання динамічних характеристик об'єктів керування .....</i>	44
1.4.5. Приклад аналітичного моделювання статички і динаміки об'єкта керування.....	51
1.4.6. Використання математичної моделі об'єкта керування в режимі датчика .....	54
1.5. Алгоритми автоматичного керування і автоматичні регулятори .....	56
<i>Регулятори з лінійними законами регулювання .....</i>	58
<i>Позиційні регулятори .....</i>	63
<i>Регулятори прямої дії.....</i>	65
<i>Цифрові регулятори.....</i>	66
1.6. Математичне моделювання систем керування .....	67
1.6.1. Математичне моделювання технологічних процесів .....	67
1.6.2. Математичне моделювання систем керування .....	69
1.6.3. Адекватність моделей.....	74
1.7. Аналіз особливостей поведінки замкненої системи керування залежно від діючих на неї збурень та характеристик регулятора .....	75
1.8. Стійкість лінійних систем.....	78
<i>Критерій Гурвиця.....</i>	81
<i>Критерій Михайлова.....</i>	88
<i>Критерій Найквіста .....</i>	91
1.9. Якість систем автоматичного керування.....	96
<i>Точнісні показники якості.....</i>	96
<i>Показники якості в перехідному режимі .....</i>	98
1.10. Параметричний аналіз систем за допомогою кореневих годографів.....	100
<b>2. ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ВПЛИВУ НА ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ</b>	
2.1. Пневматичні виконавчі механізми .....	108
2.1.1. Мембранно-пружинні виконавчі механізми.....	109
2.1.2. Пневмопоршневі приводи .....	111
2.2. Електричні виконавчі механізми .....	112

2.2.1. Виконавчі двигуни постійного струму .....	113
2.2.2. Виконавчі двигуни змінного струму .....	114
2.2.3. Промислові типи електричних виконавчих механізмів .....	116
2.3. Основні види регулювальних органів .....	118
2.4. Пристрої дистанційного керування технологічним устаткуванням і приводами .....	123
2.4.1. Контактори .....	124
2.4.2. Магнітні пускачі .....	124
2.4.3. Тиристорні підсилювачі потужності .....	127
Контрольні запитання та завдання .....	129
3. АВТОМАТИЧНІ Й АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ	
3.1. Головні принципи автоматичного керування .....	130
3.2. Види систем автоматичного керування .....	135
3.3. Основні функції автоматизованих систем керування технологічними процесами .....	139
3.4. Структура автоматизованої системи керування технологічним процесом .....	142
3.4.1. Інформаційна структура автоматизованої системи керування технологічним процесом .....	142
3.4.2. Технічна структура автоматизованої системи керування технологічним процесом .....	143
3.5. Загальний порядок розрахунку основних елементів систем керування .....	146
3.6. Особливості керування періодичними технологічними процесами .....	148
3.6.1. Характеристика періодичних технологічних процесів як об'єктів керування .....	149
3.6.2. Особливості побудови систем керування періодичними технологічними процесами .....	152
<i>Вибір критерію керування АПД</i> .....	152
<i>Розроблення математичної моделі АПД</i> .....	152
<i>Вибір структури системи керування АПД</i> .....	153
<i>Синтез алгоритмів керування АПД</i> .....	153
<i>Технічна реалізація системи керування</i> .....	153
3.6.3. Керування апаратами періодичної дії .....	154
3.6.4. Керування комплексом апаратів періодичної дії .....	156
Контрольні запитання та завдання .....	156
4. ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВОЇ ТА МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ ТЕХНІКИ У СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ТА КЕРУВАННЯ	
4.1. Загальні відомості про будову мікропроцесорів і мікропроцесорних систем .....	157
4.2. Використання мікропроцесорної техніки у вимірювальних приладах і системах .....	161
4.2.1. Особливості застосування мікропроцесорних вимірювальних приладів .....	161
4.2.2. Похибки вимірювання мікропроцесорних вимірювальних приладів .....	162
4.2.3. Автоматичні цифрові вимірювальні прилади .....	164
<i>Загальні відомості</i> .....	164
<i>Метрологічні характеристики ЦВП</i> .....	167
<i>Прилади подвійного інтегрування</i> .....	167
<i>Мікропроцесорні цифрові прилади (технологічні індикатори)</i> .....	170
<i>Цифрові програмовані багатоканальні       вимірювальні прилади (реєстратори даних)</i> .....	172
4.3. Застосування цифрової обчислювальної техніки у засобах для технологічних вимірювань .....	173

4.3.1. Уведення вимірювальної інформації про технологічні параметри в пристрої цифрової обчислювальної техніки. «Розумні» датчики .....	174
4.3.2. Застосування цифрової обчислювальної техніки у засобах для технологічних вимірювань .....	178
4.3.3. Застосування засобів цифрової обчислювальної техніки у вимірювальних системах .....	180
4.4. Цифрові системи автоматичного керування технологічними процесами .....	186
4.4.1. Загальні відомості .....	186
4.4.2. Спрощений аналіз цифрових систем автоматичного керування технологічними процесами з мікро- або міні-ЕОМ .....	188
4.4.3. Програмне забезпечення цифрових систем автоматичного керування технологічними процесами .....	194
4.5. Застосування контролерів і електронних обчислювальних машин у системах керування .....	202
4.5.1. Промислові мережі, інтерфейси, протоколи обміну .....	202
<i>Інтерфейси RS-485</i> .....	202
<i>Інтерфейси RS-232 та RS-422</i> .....	203
<i>Протоколи обміну</i> .....	204
4.5.2. Контролери для систем автоматизації .....	205
<i>Типи ПЛК</i> .....	206
<i>Архітектура ПЛК</i> .....	207
<i>Характеристики ПЛК</i> .....	208
4.5.3. Комп'ютери в системах автоматизації .....	209
<i>Комп'ютер замість контролера</i> .....	209
<i>Промислові комп'ютери</i> .....	210
4.5.4. Режими використання електронних обчислювальних машин у системах керування .....	211
<i>Режим «радника»</i> .....	211
<i>Супервізорний режим</i> .....	212
<i>Режим прямого цифрового керування</i> .....	212
4.6. Пристрої зв'язку з об'єктами керування .....	213
4.6.1. Введення та виведення аналогових сигналів. Аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі .....	214
<i>Введення аналогових сигналів</i> .....	214
<i>Аналого-цифрові перетворювачі</i> .....	214
<i>Виведення аналогових сигналів</i> .....	217
<i>Цифро-аналогові перетворювачі</i> .....	217
4.6.2. Введення та виведення дискретних сигналів .....	220
<i>Введення дискретних сигналів</i> .....	220
<i>Виведення дискретних сигналів</i> .....	220
4.6.3. Перехідні (узгоджувальні) перетворювачі .....	220
4.7. Керувально-обчислювальні комплекси на базі мікро-ЕОМ .....	224
<i>Контролери малоканалні багатофункціональні регульовані мікропроцесорні «Реміконт Р-130»</i> .....	224
<i>Модернізований малоканалний багатофункціональний мікропроцесорний контролер Р-130М</i> .....	229
<i>Багатофункціональні мікроконтролери серії КОНТРАСТ</i> .....	233
<i>Багатофункціональні мікропроцесорні контролери серії МІК</i> .....	233
Контрольні запитання та завдання .....	233

## 5. РОЗРОБЛЕННЯ СХЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ. СХЕМИ КОНТРОЛЮ ТА КЕРУВАННЯ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

5.1. Призначення схем автоматизації та загальні принципи їх виконання ..	234
5.2. Графічне зображення технологічного устаткування та комунікацій.....	236
5.3. Графічне зображення засобів вимірювання та автоматизації.....	238

5.4. Методика побудови умовних графічних позначень засобів автоматизації .....	241
5.5. Позиційні позначення на схемах автоматизації .....	249
5.6. Вимоги до оформлення та приклади виконання схем автоматизації технологічних процесів .....	251
5.7. Схеми сигналізації, блокування та захисту .....	259
5.7.1. Схеми сигналізації .....	260
5.7.2. Схеми блокування .....	264
5.7.3. Схеми захисту .....	265
Контрольні запитання та завдання .....	267
<b>6. КОНТРОЛЬ І КЕРУВАННЯ У ХІМІЧНИХ ТА НАФТОХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВАХ</b>	
6.1. Загальні підходи до вироблення стратегії керування хіміко-технологічними процесами .....	268
<i>Вибір регульованих величин і каналів уведення регулювальних впливів .....</i>	268
<i>Вибір контрольованих величин .....</i>	268
<i>Вибір сигналізованих величин .....</i>	269
<i>Вибір параметрів і способів захисту .....</i>	269
<i>Вибір засобів автоматизації .....</i>	269
6.2. Виробництво аміачної селітри .....	270
6.3. Виробництво карбаміду .....	272
6.4. Виробництво фосфатів амонію .....	275
6.5. Виробництво портландцементу .....	276
6.6. Лакофарбове виробництво .....	279
6.6.1. Процес виробництва лакових смол .....	279
6.6.2. Процес виробництва пігментованих лакофарбових емалей .....	281
6.7. Процес випалювання керамічної цегли .....	283
6.8. Виробництво сірчаної кислоти контактним способом .....	287
6.8.1. Процес випалу колчедану в киплячому (псевдозрідженому) шарі .....	288
6.8.2. Процес контактного окиснювання діоксиду сірки .....	290
6.9. Процеси конверсії метану у виробництві аміаку .....	292
6.9.1. Процес парової каталітичної конверсії метану в трубчастій печі .....	293
6.9.2. Процес пароповітряної каталітичної конверсії природного газу у шахтному реакторі .....	295
6.10. Процес алкілування бензолу .....	298
6.11. Процес гідроочищення дизельного палива .....	300
6.12. Процес уповільненого коксування .....	302
6.13. Очищення стічних вод .....	305
6.13.1. Хімічне очищення стічних вод .....	306
6.13.2. Термічне оброблення стічних вод .....	294
6.13.3. Біохімічне очищення стічних вод .....	309
<b>ДОДАТКИ</b>	
Додаток 1. Схеми автоматичного контролю та сигналізації технологічних параметрів .....	311
Додаток 2. Схеми автоматичного регулювання технологічних параметрів .....	318
Додаток 3. Специфікація устаткування, виробів і матеріалів (зразок) .....	327
Список використаної та рекомендованої літератури .....	330

Навчальне видання

Лукінюк Михайло Васильович

Контроль і керування  
хіміко-технологічними процесами

Навчальний посібник

Книга 2  
Керування хіміко-технологічними процесами

Редактор-коректор  
Т. М. Дудар

Комп'ютерна правка та верстка – *авторські*

Темплан 200\* р., поз. \*/\*\*

Підп. до друку \*\*.\*\*.2012. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Папір офс. Спосіб друку – ризографія.  
Ум. друк. арк. \*\*,\*\*. Обл.-вид. арк. \*\*,\*\*. Зам. № \*\*\*\*. Наклад 300 пр.

---

Інформаційно-видавничий центр “Видавництво «Політехніка»” НТУУ «КПІ»  
Свідоцтво про держреєстрацію ДК № 211 від 09.10.2000  
03056, Київ-56, вул. Політехнічна, 14, корп. 15