

Міністерство освіти і науки України  
Дніпровський державний технічний університет

Кафедра теплоенергетики

Конспект лекцій  
з дисципліни «**Автоматизація теплових процесів**»  
для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за  
спеціальністю 144 – Теплоенергетика

Кам'янське  
2019

Конспект лекцій з дисципліни «Автоматизація теплових процесів» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 144 –Теплоенергетика, Кам'янське : ДДТУ, 2019. - С.138

Укладач:

доцент, канд.техн.наук Долгополов І.С.

Відповідальний за випуск: зав.кафедрою теплоенергетики

доцент, канд.техн.наук Клімов Р.О.

Рецензент:

доцент, канд.техн.наук Клімов Р.О.

(Дніпровський державний технічний університет)

Затверджено на засіданні кафедри теплоенергетики

(протокол №\_\_ від \_\_\_\_\_)

У опорному конспекті з дисципліни «Автоматизація теплових процесів» використані матеріали лекцій Михайловського М.В. (Національна металургійна академія України) з дисципліни «Автоматизація промислових виробництв, мікропроцесорна техніка».

	5
1 Автоматизація виробничих процесів	7
1.1 Процес управління	7
1.2 Необхідність автоматизації сучасного виробництва	8
1.3 Особливості автоматизації теплових процесів	8
1.4 Передумови успішної автоматизації :	9
1.5 Економічна оцінка ефективності автоматизації	10
1.6 Основні вимоги до автоматизації	12
2 Технологічний об'єкт і системи управління	12
2.1 Опис технологічного об'єкту управління (ТОУ)	13
2.2 Математична модель ТОУ і основне завдання автоматизації	15
2.3 Класифікація систем автоматичного управління	16
3 Перехідні процеси і оцінка їх якості	25
3.1 Статичний і динамічний стан системи	25
3.2 Види перехідних процесів	26
3.3 Типові дії на об'єкт	27
3.4 Оцінка якості процесу управління	29
4 Функціональні схеми автоматизації	32
4.1 Призначення і види функціональних схем автоматизації	32
4.2 Позначення елементів автоматики	34
4.3 Принципи складання функціональних схем автоматизації	38
4.4 Структурні схеми контролю і управління основних теплотехнічних параметрів	45
4.4.1 АСР температури в печі	46
4.4.2 АСР тиску в робочому просторі печі	48
4.4.3 АСР співвідношення «паливо-повітря»	50
4.4.4 Автоматичний захист і сигналізація	53
5 Принципи і режими управління	55
5.1 Принцип розімкненого управління (за завданням)	55
5.2 Управління по відхиленню (принцип зворотного зв'язку)	56
5.3 Управління по збуренню (принцип компенсації)	57
5.4 Приклад реалізації принципів управління	59
5.5 Оптимальне і адаптивне управління	61
5.6 Режими функціонування систем автоматизації	63
6 Типові динамічні ланки	64

6.1	Властивості типових динамічних ланок	64
6.2	Поняття передатної функції	65
6.3	Динамічні ланки першого порядку	66
6.3.1	Пропорційна ланка	66
6.3.2	Аперіодична (інерційне) ланка першого порядку	68
6.3.3	Ідеальна інтегруюча ланка	69
6.3.4	Реальна інтегруюча ланка	70
6.3.5	Ідеальна диференціююча ланка	71
6.3.6	Реальна диференціююча ланка	72
6.3.7	Ланка чистого запізнювання	73
6.4	Класифікація динамічних ланок другого порядку	74
6.5	Передатні функції з'єднань динамічних ланок	77
6.5.1	Послідовне з'єднання	77
6.5.2	Паралельне з'єднання	78
6.5.3	Зустрічно-паралельне з'єднання ланок	78
6.5.4	Передатна функція по навантаженню	79
6.5.5	Передатна функція за завданням	79
7	Частотні характеристики систем управління	80
7.1	Амплітудна і фазова частотні характеристики	81
7.2	Поєднана частотна характеристика	84
7.3	Частотна передатна функція	85
7.4	Частотні функції з'єднань ланок	86
7.5	Логарифмічні частотні характеристики	87
8	Стійкість автоматичного систем управління	88
8.1	Поняття рівноваги і стійкості	88
8.2	Математичні критерії стійкості	90
8.3	Області стійкості САУ у фазовому просторі параметрів	94
9	Технічні засоби автоматизації	94
9.1	Склад і функції технічних засобів	94
9.2	Загальні вимоги до ТСА	97
9.3	Вимоги до технологічних датчиків	97
9.4	Виконавчі пристрої і вимоги до них	98
9.5	Регулюючі органи	100
9.6	Розробка технічних засобів автоматизації	101
10	Автоматичні регулюючі пристрої	102

10.1	Типові оптимальні перехідні процеси регулювання	103
10.2	Закони регулювання і автоматичні регулятори	104
10.3	Синтез законів регулювання	109
10.4	Оптимальне управління	111
11	Мікропроцесорна техніка	112
11.1	Синтез логічних пристроїв	112
11.2	Мікропроцесорні системи	120
11.3	Структура і основні функції мікроконтролерів	122
12	Обчислювальні комплекси, що управляють	130
12.1	Принципи побудови обчислювальних комплексів, що управляють	130
12.2	Технічні і програмні компоненти УОК	133
12.3	Вимоги до УОК	135
	Рекомендована література	136
	Додатки	137

## ВСТУП

Під автоматикою розуміють галузь науки і техніки, що охоплює теорію і практику побудови систем управління, діючих без безпосередньої участі людини. Автоматизація - сукупність методів і технічних засобів, що виключають участь людини при виконанні операцій конкретного процесу.[1]

Як самостійна область техніки автоматика отримала визнання на II -ої Світової енергетичної конференції (Берлін, 1930), де була створена секція з питань автоматичного і телемеханічного управління. У СРСР термін «автоматика» отримав поширення на початку 30-х рр. XX століття. Автоматика як наука виникла на базі теорії автоматичного регулювання, основи якої були закладені в роботах Дж. Максвелла (1868), І. А. Вышнеградського (1872-1878), А. Стодоли (1899) та ін. В самостійну науково-технічну дисципліну остаточно оформилася до 1940 р.

Історія автоматики як галузі техніки тісно пов'язана з розвитком автоматів, автоматичних пристроїв і автоматизованих комплексів. У стадії становлення автоматика спиралася на теоретичну механіку і теорію електричних ланцюгів і систем і вирішувала завдання, пов'язані з регулюванням тиску в парових котлах, ходу поршня парових і частоти обертання електричних машин, управління роботою верстатів-автоматів, АТС, облаштуваннями релейного захисту. Відповідно і технічні засоби автоматики в цей період розроблялися і використовувалися стосовно систем автоматичного регулювання. Інтенсивний розвиток усіх галузей науки і техніки у кінці I половини XX ст. викликало також швидкий ріст техніки автоматичного управління, застосування якої стає загальним.

Друга половина XX ст. ознаменувалася подальшим вдосконаленням технічних засобів автоматики і широким, хоча і нерівномірним для різних галузей народного господарства, поширенням автоматичних управляючих пристроїв, з переходом до складніших автоматичних систем, зокрема в промисловості - від автоматизації окремих агрегатів до комплексної автоматизації цехів і заводів. Істотною рисою є використання автоматики на об'єктах, територіально розташованих на великих відстанях один від

одного, наприклад великі промислові і енергетичні комплекси, системи управління космічними літальними апаратами і так далі

Для зв'язку між окремими пристроями в таких системах застосовуються засоби телемеханіки, які спільно з облаштуваннями управління і керованими об'єктами утворюють телеавтоматичні системи. Великого значення при цьому набувають технічні (у тому числі телемеханічні) засоби збору і автоматичної обробки інформації, оскільки багато завдань в складних системах автоматичного управління можуть бути вирішені тільки за допомогою обчислювальної техніки. Нарешті, теорія автоматичного регулювання поступається місцем узагальненої теорії автоматичного управління, що об'єднує усі теоретичні аспекти автоматики і становить основу загальної теорії управління.

Важливим поняттям автоматики є «автомат». Автомат (від греч. *autómatos* - самодіючий) - самостійно діючий пристрій (чи сукупність пристроїв), що виконує за заданою програмою без безпосередньої участі людини процеси отримання, перетворення, передачі і використання енергії, матеріалу і інформації. Автомати застосовуються для підвищення продуктивності і полегшення праці людини, для звільнення його від роботи у важкодоступних або небезпечних для життя умовах.

Автомат - одне з основних понять кібернетики; абстрактна модель технічної або біологічної системи, що переробляє дискретну (цифрову) інформацію дискретними тимчасовими тактами. Найбільш вивчені кінцеві автомати. Вивченням таких автоматів займається теорія автоматів.

У техніці вводиться поняття «Автоматичне управління» - сукупність дій, спрямованих на підтримку або поліпшення функціонування керованого об'єкту без безпосередньої участі людини відповідно до заданої мети управління. Автоматичне управління широко застосовується у багатьох технічних і біотехнічних системах для виконання операцій, не здійснених людиною у зв'язку з необхідністю переробки великої кількості інформації в обмежений час, для підвищення продуктивності праці, якості і точності регулювання, звільнення людини від управління системами, що функціонують в умовах відносної недоступності або небезпечних для здоров'я.

## 1 АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

Технологічні процеси (ТП) є впорядкованою сукупністю дій - операцій, які діляться на два основні види : робочі операції і операції управління.

*Робочі операції* - це дії, пов'язані зі зміною форми і розмірів предмета праці (наприклад, деформація металу у валках прокатного стану), його енергетичного стану (нагрів заготовки перед плющенням), положення в просторі (переміщення заготовки рольгангом).

Для полегшення і удосконалення робочих операцій використовуються різні технічні пристрої, частково або повністю замінюючи людину в цій операції. Заміна праці людини в робочих операціях з метою звільнення його від фізично важкої, шкідливої і рутинної роботи називається *механізацією*.

### 1.1 Процес управління

Для правильного і якісного виконання робочих операцій потрібні супроводжуючі їх дії іншого роду - *операції управління*. Так, наприклад, для здійснення робочої операції переміщення заготовки краном необхідно визначити: в який момент почати виконання операції, на яку висоту підняти заготовку, з якою швидкістю і по якій траєкторії її переміщати, в який момент і в якому місці її покласти.

Сукупність операцій, що управляють, утворює *процес управління*.

На відміну від робочих операцій для здійснення операцій управління не потрібно велику кількість енергії, оскільки при виконанні цих операцій об'єктом являється не речовина або енергія, а інформація, яку отримують, передають, обробляють, аналізують, фіксують і так далі .

Тому, управління - це, передусім, *інформаційний процес*.

Операції управління також можуть виконуватися технічними пристроями. Заміна праці людини в операціях управління називається *автоматизацією*, а технічні пристрої, що виконують операції управління - *автоматичними пристроями*.



## 1.2 Необхідність автоматизації сучасного виробництва

- реалізація швидко протікаючих процесів, управління якими вручну неможливо в силу обмежених фізіологічних можливостей людини
- забезпечення високої точності технологічних процесів, яку неможливо досягти при ручному управлінні
- необхідність обробки великих об'ємів інформації для аналізу взаємозв'язку параметрів при управлінні складними процесами
- об'єктивність управління, незалежно від індивідуальних якостей людини-оператора, його кваліфікації, фізичного і психічного стану
- необхідність дистанційного керування шкідливими і небезпечними технологічними процесами.

## 1.3 Особливості теплових процесів, як об'єктів автоматизації

Особливості теплових об'єктів обумовлені наступними чинниками. Багатовимірність - безліч чинників, що впливають на хід теплових процесів.

1. Розподіленість у просторі устаткування і предметів праці.
2. Інерційність - велике запізнювання у реагуванні на збурення і управління.
3. Складність і низька точність виміру технологічних параметрів із-за впливу потужних техногенних перешкод та відсутність потрібної експресної техніки вимірювання якісних параметрів сировини та кінцевої продукції у потоці.
4. Вузкий діапазон зміни чинників при пасивному експерименті.
5. Небажаність або неприпустимість активного експерименту.
6. Складність і дорожнеча фізичного моделювання.
7. Імовірнісний характер більшості технологічних процесів.
8. Як наслідок, для технологічних процесів характерні обмеженість теоретичних представлень і неповнота емпіричної інформації про процеси.

9. Нелінійність, обумовлена складними взаємозв'язками чинників. Моделі цих процесів, як правило, містять елементи транспортного запізнення.

Тому автоматизувати теплові об'єкти важко і для управління ними потрібні складні і дорогі системи управління.

Але

- 1) нелінійності, що характерні для реальних теплових об'єктів, монотонні і дозволяють використовувати математичний апарат лінійної теорії регулювання;
- 2) динамічні властивості теплових об'єктів у більшості випадків задаються експериментальними даними у вигляді кривих розгону, імпульсних або частотних характеристик.

Позитивний момент у автоматизації теплових процесів у промисловості - величезні матеріальні і енергетичні потоки виробництв, що використовують теплові процеси у технологіях, визначають великий економічний ефект навіть від незначного удосконалення теплових процесів.

#### **1.4 Передумови успішної автоматизації :**

- *достатній рівень механізації* - автоматизація не усуває недоліків механізації (ненадійність механізмів, недостатня потужність приводів, фізичний знос устаткування не дозволяють навіть самій кращій системі забезпечити випуск якісної продукції).
- *висока культура виробництва* - автоматизація не вирішує організаційні проблеми (відсутність продуманого порядку, нечіткий розподіл обов'язків серед виробничого персоналу, низька технологічна дисципліна зведуть нанівець зусилля розробників САР).
- *повнота і точність інформації про процес* (оснащення устаткування необхідними датчиками і захист їх від техногенних дій), *що автоматизується*.
- *надійність* технічних засобів автоматизації (ТЗА).

Нинішня техніка автоматизації має високу надійність. Середній час напрацювання на відмову модулів обчислювальних комплексів, що управляють, - 10 і більше років. Це означає, що техніка практично не відмовляє.

Найчастіше збої в роботі АСУ (автоматизованих систем керування) відбуваються із-за недосконалості управляючих програм. Це пов'язано з тим, що для кожної АСУ конкретним технологічним процесом розробляється спеціальне (унікальне) програмне забезпечення (ПЗ), в процесі написання, налагодження і супроводі якого неминучі помилки. Для того, щоб звести їх до мінімуму, розробляються і впроваджуються різні системи автоматизації програмування і діагностики роботи ПЗ.

### **1.5 Економічна оцінка ефективності автоматизації**

Оцінка економічної ефективності систем автоматичного регулювання і управління багато в чому визначається правильним вибором критерія діяльності автоматизованого виробництва.

Неправильний вибір такого критерія призводить до необґрунтованих технічних рішень і додаткових витрат. Наприклад, виключення капітальних витрат на автоматизацію з собівартості продукції призводить, як правило, до необґрунтованого ускладнення систем управління і тривалих термінів окупності засобів автоматизації.

Так в умовах металургійної промисловості з потужними теплоенергетичними процесами (доменна піч, конвертор, прокатний стан), виробництва мають відносно невелику чисельність обслуговуючого персоналу, автоматизація основних агрегатів не призводить до істотного вивільнення робочої сили, а вимагає залучення більш кваліфікованої праці для обслуговування систем контролю і управління. Проте поліпшення організації виробництва, функціонування технологічних агрегатів і, особливо, підвищення якості металопродукції повністю компенсують виникаючі при цьому додаткові витрати.

На допоміжних операціях (контроль, обробка, маркування, упаковка і тому подібне) автоматизація дозволяє значно скоротити чисельність персоналу і за рахунок цього отримати економічний ефект.

Зазвичай в якості критерія ефективності використовується прибуток, що додатково отримується на підприємстві у зв'язку з автоматизацією виробництва. При цьому критерієм оцінки роботи систем автоматизації найчастіше виступає термін окупності виробничих витрат.

Проте, окрім цього економічного ефекту, необхідно оцінювати також загальний господарський ефект, який може значно перевищувати ефект окремого підприємства, а також: а) підвищення продуктивності агрегатів еквівалентно будівництву нових виробничих потужностей;

б) поліпшення якості продукції подовжує термін служби виготовлених з неї виробів, що, по суті, еквівалентно збільшенню виробництва;

в) економія сировини і палива еквівалентна збільшенню добування руди, вугілля, газу, нафти.

У теплоенергетичних агрегатах, що є об'єктами автоматичного управління, протікають складні фізично-хімічні явища. Для управління технологічним процесом необхідно мати в розпорядженні інформацію про початкові умови виробництва (параметри сировини, палива і тому подібне), хід процесу, роботу устаткування і кінцеві результати.

Отримання інформації і її використання для управління технологічними процесами пов'язані з витратами на придбання і експлуатацію технічних засобів автоматизації (ТЗА) (датчиків, автоматичних регуляторів, мікропроцесорів, обчислювальних машин і виконавчих пристроїв).

Чим більше чинників ми вимірюємо, стабілізуємо, оптимізуємо, тим дорожче АСУ. Дослідження показали, що ефективність систем управління  $E$  і капітальні вкладення  $K$  (витрати на їх придбання, виготовлення, монтаж, налагодження, перевірку і обслуговування) пов'язані експоненціальною залежністю

$$E = E_{\max} (1 - V_0 \exp(-K_{\text{авт}} / K_0)),$$

де  $E$  - ефективність впровадження цієї АСУ;

$K_0$  - вартість системи управління до початку робіт по автоматизації;

$K_{авт}$  - вартість автоматизованої системи;

$E_{max}$  - максимальна ефективність, що відповідає повному об'єму контролю і автоматизації об'єкту;

$V_0$  - коефіцієнт, що характеризує початковий стан об'єкту.

З цієї залежності виходить, що у міру збільшення витрат на автоматизацію поточна ефективність  $E$  неухильно підвищується, наближаючись до максимально досяжної  $E_{max}$ .

Ефективність автоматизації вимірюють також співвідношенням  $T = (\Delta K / \Delta E)$ , де  $\Delta K$  - витрати на автоматизацію, грн;  $\Delta E$  - приріст ефективності виробництва в результаті його автоматизації, грн/рік. Це відношення і є терміном окупності АСУ.

Оскільки залежність  $E = f(K)$  нелінійна, то у міру збільшення витрат приріст ефективності  $\Delta E$  на одиницю витрат  $\Delta K$  зменшується.

## 1.6 Основні вимоги до автоматизації

1. Раціональний рівень автоматизації конкретного виробництва має бути обгрунтований економічно. Цей рівень визначається не лише технологічними і технічними показниками, але і соціально-економічними наслідками автоматизації.

2. Складність алгоритмів управління повинна відповідати поставленому завданню автоматизації.

3. Впровадження АСУ доцільне звітці поетапно, створюючи ієрархічні системи. Наприклад, I рівень - САК, II рівень - САР, III рівень - АСУ ТП, IV рівень - АСУП.

При цьому підвищується надійність і ефективність управління завдяки автономному функціонуванню нижніх рівнів.

4. Максимальний економічний ефект досягається в ході розробки нових технологічних процесів і агрегатів з повною їх автоматизацією при використанні досягнень теорії автоматичного управління (ТАУ), сучасної елементної бази ТСА і управляючих обчислювальних комплексів (УОК).

## 2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ОБ'ЄКТ І СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

Сукупність технічних пристроїв (машин, знарядь праці, засобів механізації), що реалізують технологічний процес, називається *об'єктом управління*. У поєднанні із засобами управління він утворює *систему управління (СУ)*.

Система управління, в якій робочі операції, якими управляють, виконуються без участі людини, називається *автоматичною*.

Система, в якій автоматизована тільки частина операцій управління, а інша частина (зазвичай найбільш відповідальна) виконується людьми, називається *автоматизованою*.

Круг об'єктів і операцій управління дуже широкий. Він охоплює технологічні процеси і агрегати, групи агрегатів, цехи, цілі підприємства, людські колективи, організації, держави і так далі

З цієї множини фахівці з автоматизації займаються тільки такими видами управління, які властиві головним чином технічним об'єктам і технологічними процесам.

### 2.1 Опис технологічного об'єкту управління (ТОУ)

Будь-який об'єкт управління характеризується сукупністю технічних величин, що називаються *параметрами*. На рисунку 2.1 приведена класифікація параметрів технологічного об'єкту управління ТОУ.

*Внутрішні параметри* не змінюються в процесі функціонування об'єкту. Наприклад, внутрішніми параметрами методичної нагрівальної печі як об'єкту управління можна рахувати габарити печі, кількість форсунок, їх прохідний переріз і тому подібне.

*Зовнішні параметри* об'єкту управління можна розділити на вхідні і вихідні.

*Вихідні параметри* (залежні змінні, регульовані величини) характеризують якість керованого процесу - мету управління.

Наприклад, для нагрівальної печі в якості таких величин можна розглядати температуру внутрішньопічного простору, температуру заготовок на виході печі, перепад температури по їх довжині і перетину і тому подібне

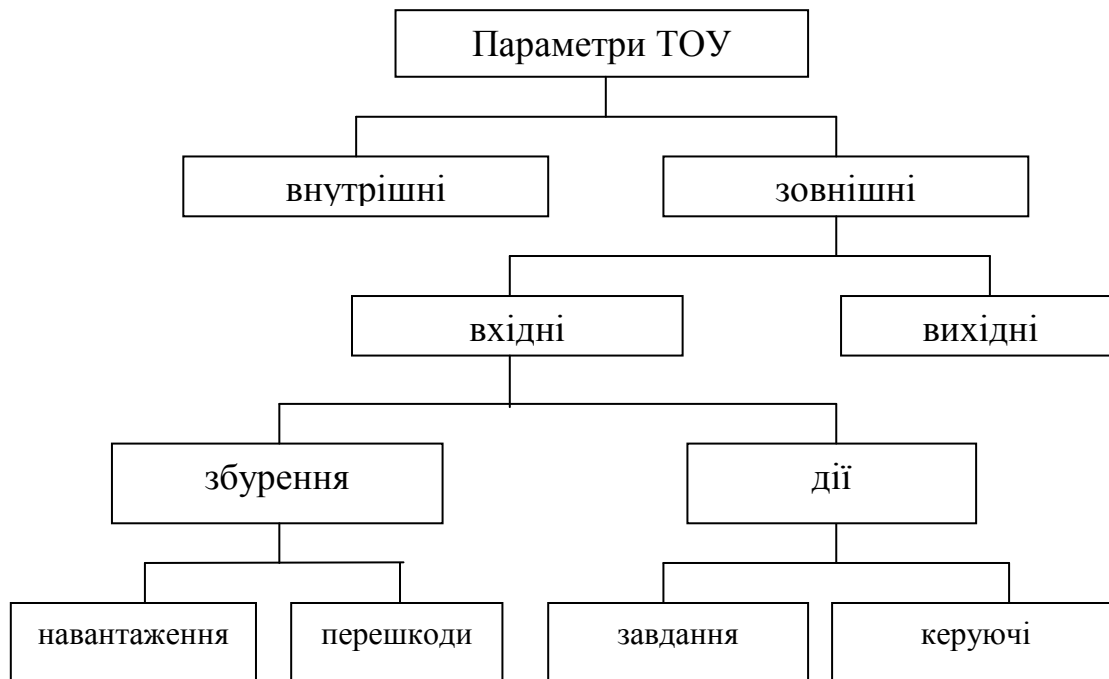


Рис. 2.1. Класифікація параметрів об'єкту управління

*Вхідні параметри* діляться на некеровані збурення і керовані дії.

*Збурення* бувають двох видів: навантаження і перешкоди.

*Навантаження* – це корисне збурення, яке не тільки допускається при нормальній роботі об'єкту, але і нерозривно пов'язано з його призначенням.

*Наприклад, для штампувального преса навантаженням є змінний опір заготовки, з якої отримують необхідний виріб.*

*Перешкода* – це шкідливе збурення, що заважає нормальному функціонуванню об'єкту. *Наприклад, для електронечі – це коливання живлячої напруги.*

*Дії* здійснюються людиною або автоматичним пристроєм і теж діляться на два види: *завдання*, які визначають необхідне значення

вихідної величини в штатному режимі роботи об'єкту, і *керівні дії*, які покликані компенсувати дію збурень випадкового характеру.

Описати будь-яку технічну систему як об'єкт управління – означає визначити для неї усі вхідні і вихідні параметри.

## 2.2 Математична модель ТОУ і основне завдання автоматизації

На рисунку 2.2 об'єкт управління показаний прямокутником ТОУ, автоматичний пристрій – прямокутником АУ, а вхідні дії і вихідні змінні – стрілками. Сукупність вихідних змінних позначена вектором  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_q)$ , сукупність задаючих дій – вектором  $G = (g_1, g_2, \dots, g_n)$ , дій, що управляють, – вектором  $V = (v_1, v_2, \dots, v_m)$ , а збурень – вектором  $F = (f_1, f_2, \dots, f_k)$ .

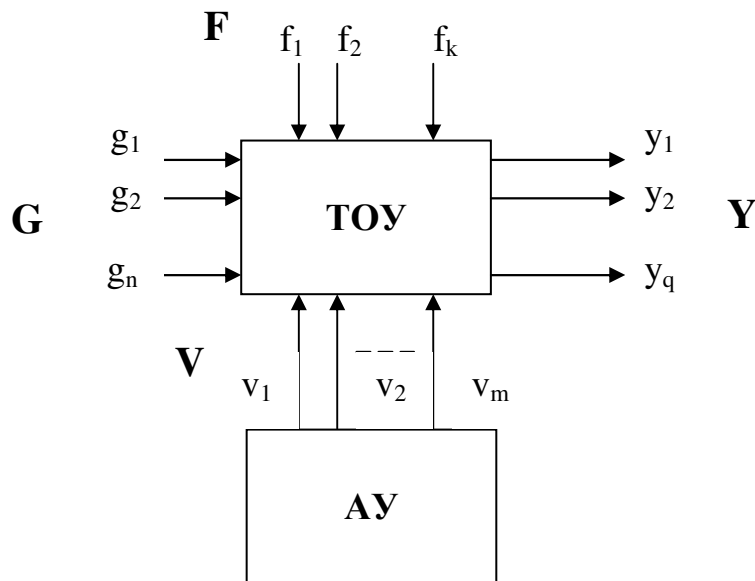


Рис. 2.2. Об'єкт управління

Вектори  $Y$ ,  $G$ ,  $V$  і  $F$  залежно від природи об'єкту можуть бути зв'язані функціонально. Математичну модель ТОУ можна записати в загальному виді  $Y = \Phi\{G, V, F\}$ , де  $\Phi$  – оператор, що визначає вид математичного опису.

У простому випадку функціональної залежності  $y = \Phi(g, v, f)$  об'єкт називається статичним або безінерційним. Проте, більшість об'єктів є динамічними, оскільки під дією зовнішніх сил їх стан не може бути



змінене миттєво. У таких об'єктах змінні  $y$ ,  $g$ ,  $v$  і  $f$  зазвичай зв'язані між собою диференціальними рівняннями, що містять як незалежну змінну час  $t$ .

$$Y(t) = \Phi \{G(t), V(t), F(t)\}.$$

Основне завдання автоматизації полягає у пошуку і реалізації таких управляючих дій  $V$ , які забезпечать заданий характер  $G$  зміни вихідних змінних  $Y$  в умовах дії збурень  $F$ .

Дії, що управляють, визначаються залежністю

$$V(t) = A,$$

яка називається *алгоритмом* або *законом управління*.

## 2.3 Класифікація систем автоматичного управління

### I За цілями управління і видами алгоритмів

При автоматизації технологічних процесів виникає необхідність у вирішенні різних завдань. При цьому цілями управління можуть бути досягнення максимальної продуктивності, економічності виробництва або оптимальна якість продукції.

За видами алгоритмів, що реалізуються розрізняють системи автоматизації:

1. *Аналітичні*, в яких управління ведеться по детермінованою математичною моделлю.
2. *Статистичні*, де для управління використовуються імовірнісні (стохастичні) моделі процесу.
3. *Пошукові*, в яких здійснюється автоматичний пошук оптимального управління.
4. *Комбіновані*, що поєднують різні комбінації попередніх типів.

### II. За типом систем автоматичного управління

У теплоенергетиці широко використовується як системи автоматичного регулювання окремих параметрів, так і системи комплексного автоматичного управління технологічними процесами і цілими виробництвами.

*Системи логічного управління* використовуються для початку ТП, переходу від однієї операції до іншої і завершення ТП.

*Системи автоматичного контролю* технологічних параметрів процесу відповідають за вимірювання значень параметрів і представлення їх в зручній для людини формі.

*Системи автоматичного регулювання* забезпечують задане значення вихідної величини, яке може бути постійним або змінюватися певним чином у функції часу або іншого параметра.

*Системи автоматичного управління* забезпечують доцільну роботу об'єкту управління в рамках можливих ресурсів.

### **III. За видом математичного опису**

*Лінійні системи* описуються лінійними диференціальними рівняннями. Для лінійних систем справедливий *принцип суперпозиції*. Реакція системи на будь-яку комбінацію зовнішніх дій дорівнює сумі її реакцій на кожну з цих дій окремо.

Це дозволяє представити реакцію системи на будь-який складний вплив через послідовність її реакцій на прості дії. Завдяки цьому принципу і була розроблена **загальна** теорія лінійних САУ.

**Проте** практично всі реальні системи нелінійні, оскільки система стала нелінійною досить мати в її складі **хоч б** одну нелінійну ланку.

*Нелінійні системи* описуються нелінійними рівняннями, які в загальному вигляді не вирішуються. Тому для отримання аналітичного рішення, що описує поведінку таких систем, вдаються до *лінеаризації* – заміни нелінійних залежностей лінійними наближеннями, які не дуже спотворюють реакцію реальних САУ.

*Стаціонарною* називають САУ, всі внутрішні параметри якої постійні. У *нестационарній* системі її параметри є функціями часу. Тому реакція такої САУ на одну і ту ж дію залежить від моменту його

застосування. Наприклад, САУ польотом ракети, маса якої змінюється у міру витрати палива.

#### IV. За видами сигналів

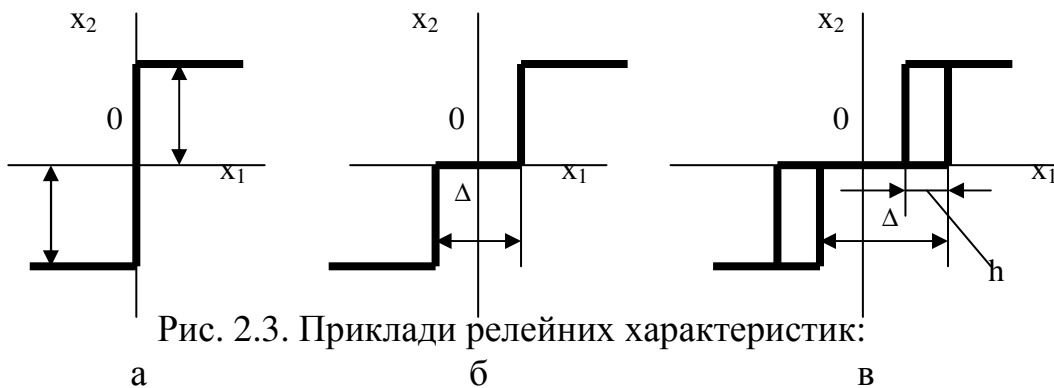
Залежно від виду вхідних і вихідних сигналів розрізняють безперервні і дискретні системи.

У *безперервних (аналогових) системах* усі сигнали є безперервними функціями часу. Часто-густо для передачі інформації використовуються гармонійні сигнали, що модулюються за амплітудою, частотою або фазі

$$y = A \sin (\omega t + \varphi).$$

*Дискретна система* містить хоч би одну ланку дискретної дії, вихідна величина  $Y$  якого змінюється дискретно (скачками) навіть при плавній зміні вхідних величин  $X$ .

Якщо скачки  $Y$  відбуваються при проходженні  $X$  певних порогових значень (квантування по рівню на Рис.2.3) – маємо *релейні системи*. Якщо скачки  $Y$  відбуваються через певні інтервали (дискретизація за часом) отримуємо *імпульсні системи*.



а – звичайні; б – із зоною нечутливості  $\Delta$ ;

в - із зоною нечутливості  $\Delta$  і гістерезисом  $h$ .

У техніці автоматичного управління для передачі інформації широко використовується амплітудна, широтна або частотна модуляція.

У *кодово-імпульсних системах* квантування сигналів здійснюється як за часом, так і по рівню. До цього великого класу АСУ відносяться і

*цифрові системи* – ЕОМ і мікропроцесори, в яких інформація про параметри об'єктів циркулює у вигляді числових кодів.

У *комбінованих системах* аналогові і дискретні сигнали взаємно перетворюються.

## V. За характером задаючої дії

1) У *системах автоматичної стабілізації (САС)* задаюча дія залишається постійною. Основне завдання – підтримка регульованої величини, незалежно від збурень, на постійному рівні з допустимою погрішністю – *регулювання по збуренню*.

САС характеризуються відхиленням регульованої величини – різницею між значенням регульованої величини в даний момент часу і її заданим постійним значенням.

$$\delta(t) = y(t) - y_0.$$

Це дає якісну оцінку динамічним властивостям САС.

На рисунку 2.4 приведено графік зміни регульованої величини  $y(t)$ . Хай у момент часу  $t_1$  збурююча дія  $f(t)$  стрибком змінилася від величини  $F_1$  до величини  $F_2$  (пряма 1). Це викличе зміну регульованої величини  $y(t)$  (крива 2) і відхилення її від початкового значення  $y(t_1)$ . Тоді, відповідно до визначення, ордината ВС представлятиме відхилення регульованої величини у момент часу  $t_2$ . Прикладом таких систем є система стабілізації температури методичної нагрівальної печі прокатного стану.

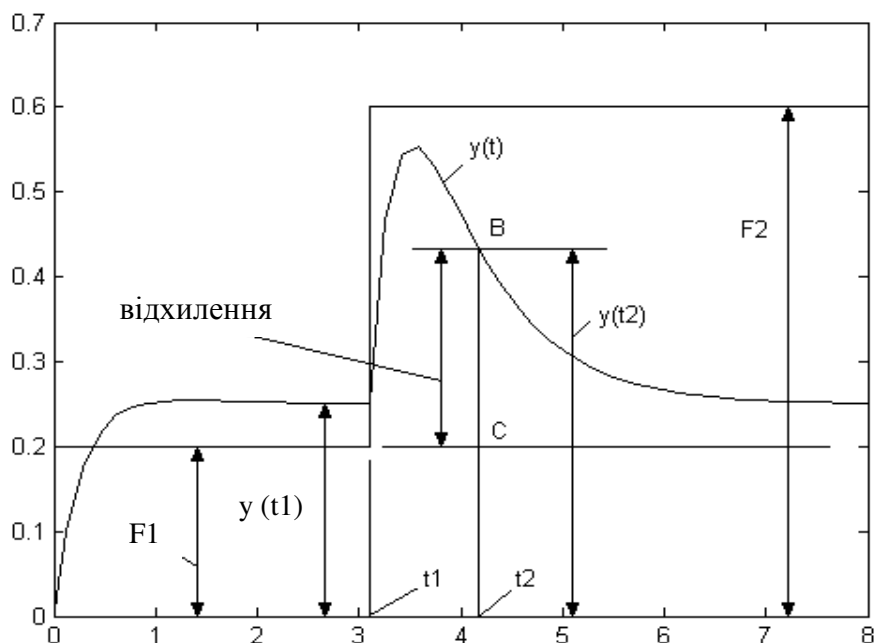


Рис.2.4. Зміна параметрів в системі автоматичної стабілізації

Системи програмного управління (СПУ) забезпечують зміну регульованої величини по наперед заданому закону – програмі. Задаюча дія є відомою функцією часу або координат системи (рисунок 2.5).

При управлінні за завданням про точність роботи системи судять по величині динамічної помилки, яка визначається як різниця між задаючою дією і регульованою величиною в даний момент часу  $\Delta(t) = g(t) - y(t)$ .

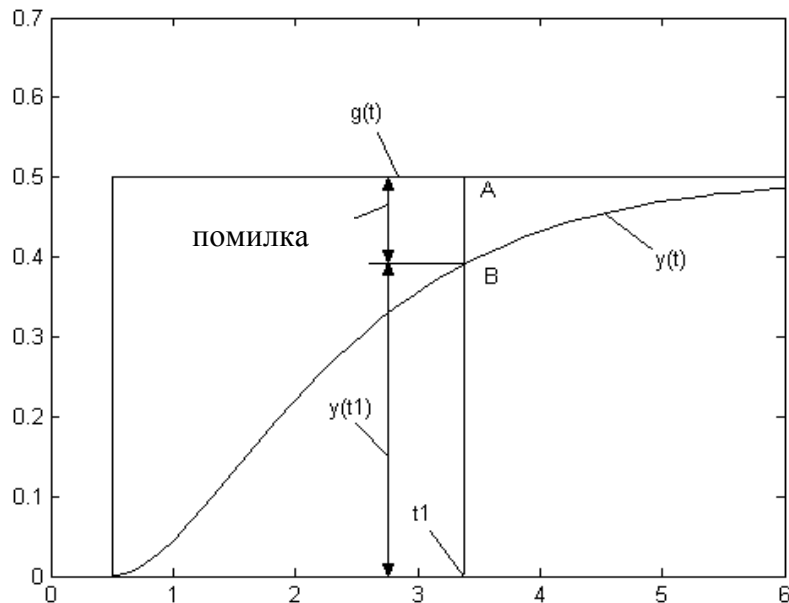


Рис.2.5. Зміна параметрів в системі програмного управління

Припустимо, що задаюча дія  $g(t)$  у момент часу  $t=0$  стрибком змінилася від нуля до деякої постійної величини і в подальші моменти часу залишається незмінною (лінія 1). Це викличе реакцію системи, визначувану кривою 2. Тоді помилкою для моменту часу  $t_1$  буде відрізок АВ.

Приклад – система програмного управління нажимним пристроєм реверсивного прокатного стану, який забезпечує зміну положення верхнього валка перед кожним проходом відповідно до заданої програми обтиску.

У стежачих системах задаюча дія так само, як в системах програмного управління, є змінною величиною. Проте джерелом задаючого сигналу служить випадкова зовнішня дія.

Наприклад, система синхронізації швидкості каретки летючих ножиць із швидкістю плющення в останній кліті безперервного стану є стежачою системою. У ній каретка «стежить» за рухом смуги.

Оскільки стежачі системи призначені для відтворення на виході задаючої дії з можливо більшою точністю, то якість їх роботи теж оцінюють *динамічною помилкою*

$$\delta(t) = g(f(t)) - y(t).$$

## VI. По методу управління

*Звичайні системи* не змінюють своїх властивостей під час експлуатації. У цих системах не враховуються зміни, що відбуваються в об'єкті управління і у виробничих умовах.

Для досягнення цілей управління регулятор може не тільки виробляти дії, що управляють, на об'єкт, але і змінювати свої налаштування, закони регулювання і, навіть, структуру. При цьому міняються властивості системи управління в цілому.

*Адаптивні системи* можуть змінювати свої властивості в процесі експлуатації, пристосовуючись до змін умов роботи об'єкту.

На основі аналізу результатів управління об'єктом в *самоналагоджувальних* системах коректуються налаштування автоматичних регуляторів, а в *тих, що самоорганізуються* – і сама структура системи.

У *ігрових системах* моделюються варіанти управління з урахуванням можливих реакцій об'єкту. При цьому використовується набір шаблонних вирішень завдань управління і/або пошук оптимальної стратегії управління методом проб і помилок.

Сфера застосування адаптивних і ігрових систем – управління складними динамічними стохастичними об'єктами.

## VII. Статичні і астатичні системи управління

Система називається *статичною*, якщо стале після закінчення перехідного процесу значення регульованої величини залежить від навантаження. При цьому виникає *статична помилка* системи.

На рисунку 2.6 показана статична система регулювання рівня води у баці. Перед системою поставлено завдання підтримувати рівень рідини в баці 1 постійним при будь-яких збуреннях. До таких збурень найчастіше відносяться зміни навантаження, тобто витрати води на виході бака. Вимірювання рівня рідини здійснюється за допомогою поплавця 2, який тягою 3 шарнірно з'єднаний із засУОК ою 4, і змінює подачу рідини у бак так, щоб регульований рівень відповідав заданому значенню.

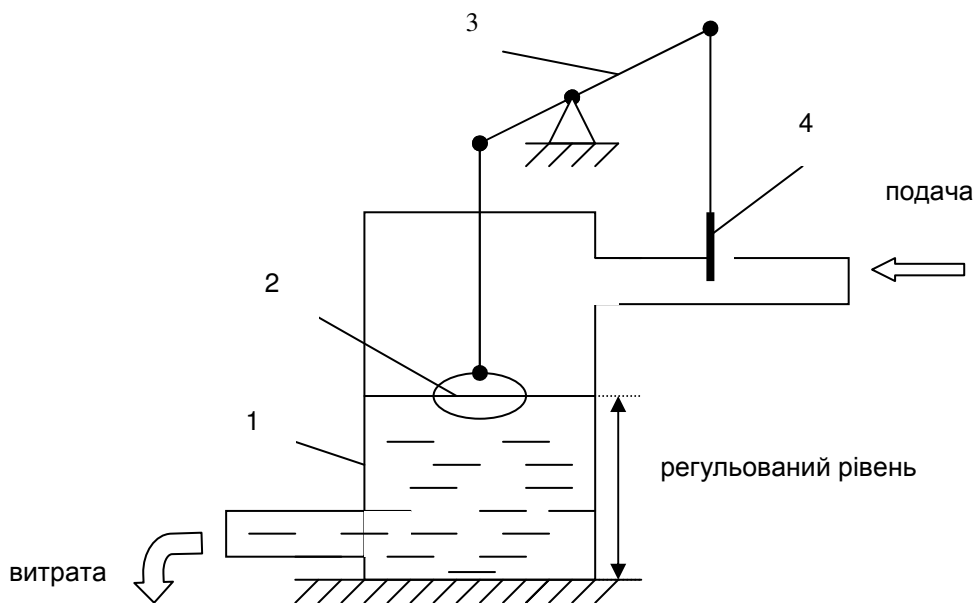


Рис.2.6. Статична система регулювання

При збільшенні витрати рівень води у баці починає знижуватися, поплавець опускається і переставляє засУОК у, збільшуючи її прохідний перетин. Кількість води, що поступає у бак, збільшується, і рівень її починає підвищуватися. Рівновага наступить тоді, коли прихід води дорівнюватиме її витраті. Чим більше навантаження, тобто витрата, тим більше буде відкрита засУОК а і, отже, тим нижче знаходитиметься поплавець в стані рівноваги. А це означає, що із зростанням навантаження в даній системі рівень води, тобто регульованої величини, зменшуватиметься.

Системи регулювання, в яких для переміщення регулюючого органу використовується внутрішня енергія системи (наприклад, чутливого елемента – поплавця на рис.2.6) називаються *системами прямої дії*.

У деяких системах статична помилка недопустима. Тоді застосовують астатичні системи, в яких вона дорівнює нулю. Для отримання такої системи необхідно усунути жорстку залежність між положенням регулюючого органу (у нашому прикладі – засУОК и) і значенням регульованої величини з тим, щоб задане значення регульованої величини можна було підтримувати при будь-якому навантаженні, тобто при будь-якому положенні регулюючого органу.

На рисунку 2.7 показана астатична система регулювання рівня рідини в баку. У цій системі, регулятор налаштовується на необхідний режим шляхом відповідного узгодження положення поплавця 2 і повзунка потенціометра 3. При зміні рівня рідини зміниться положення поплавця, що викличе переміщення повзунка 3 на потенціометрі і приведе до обертання двигуна 4. Останній відповідно до знаку зміни рівня відкриє або закриє засУОК у 5. При цьому обертання двигуна продовжуватиметься, поки повзунок знов не займе положення точно напроти середньої точки потенціометра, тобто поки рівень рідини не буде відновлений.

При такому *непрямому регулюванні* використовується стороннє джерело енергії. Залежно від виду цієї енергії розрізняють електричні, пневматичні, гідравлічні і різноманітні комбіновані системи.

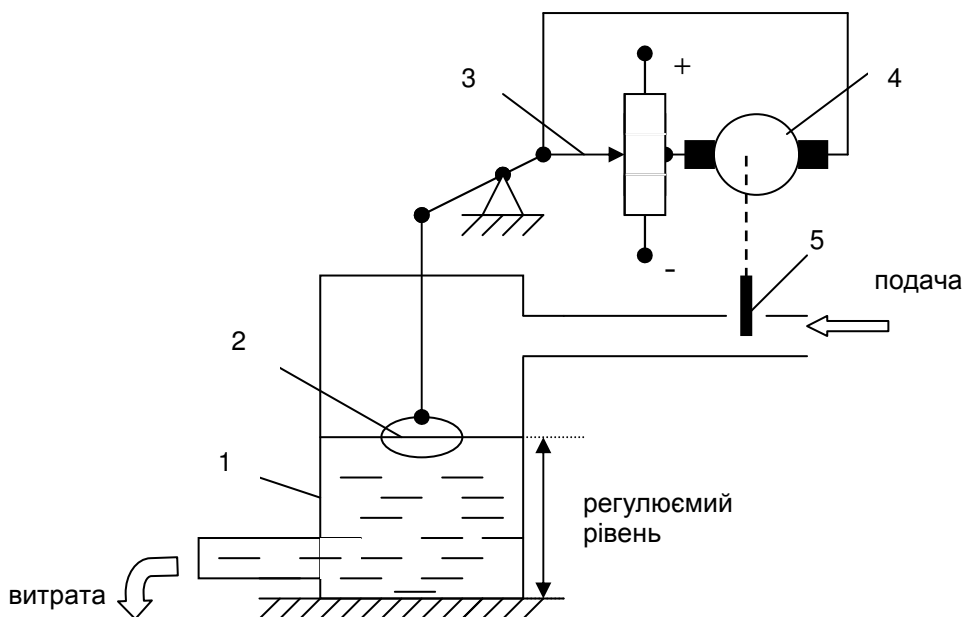


Рис.2.7. Астатична система регулювання



**VIII. Рівні АСУ.** По ступеню складності і супідрядності системи управління розподіляються на автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУ ТП) і автоматизовані системи управління виробництвом (АСУП).

При цьому, перший рівень складають засоби отримання і перетворення інформації, другої і третій – локальні регулюючі пристрої, четвертий, – засоби для централізованого управління і останній, п'ятий рівень – АСУП.

По структурі як АСУ ТП, так і АСУП діляться на дві групи:

1. Централізовані – в яких управління регулюючими органами на об'єкті управління здійснюється безпосередньо від ЕОМ, що управляє.

2. Розподілені – в яких УВМ видає завдання локальним системам автоматичного регулювання окремих параметрів, що забезпечують оптимальний режим роботи об'єкту управління.

Приведена класифікація систем управління свідчить про велику різноманітність методів і засобів автоматичного управління.

Вибір тієї або іншої системи визначається вимогами вдосконалення технології і цілями управління виробничими процесами.

## 3 ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ І ОЦІНКА ЇХ ЯКОСТІ

### 3.1 Статичний і динамічний стан системи

У статичному стані збурюючі дії, що управляють, на систему постійні. Якщо при цьому значення регульованого параметра дорівнює заданій величині, то говорять про сталий *режим роботи* системи управління.

Залежність між вихідними  $Y$  і вхідними  $X$  величинами в сталих режимах роботи (Рис.3.1) називається *статичною характеристикою* системи. Статичні характеристики дають можливість оцінити характер і ступінь зв'язку між вхідними і вихідними величинами.

На практиці статичні режими вельми рідкісні, оскільки численні збурення постійно виводять систему із стану рівноваги. Режим, відмінний від статичного, називають *динамічним*, а перехід в часі від початкового сталого стану до нового називається *перехідним процесом*.

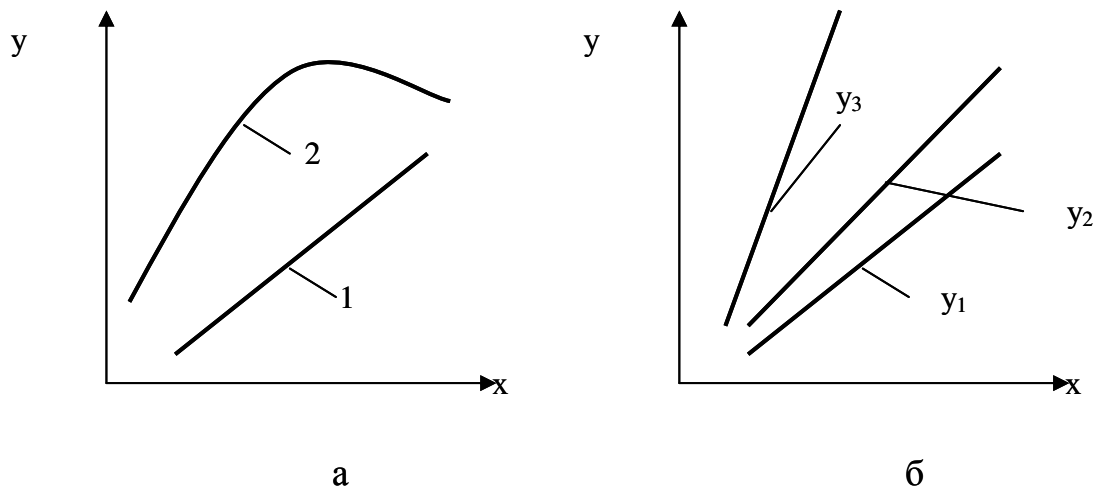


Рис.3.1. Вид статичних характеристик об'єктів:  
 а – з одним виходом; б – з декількома виходами;  
 1 – лінійна; 2 – нелінійна характеристики

### 3.2 Види перехідних процесів

Види перехідних процесів в системах управління визначаються характером зміни вихідної величини при спрямуванні тієї або іншої дії на систему.

Вони можуть бути такими, що коливаються або неперіодичними, такими, що сходяться або розходяться (Рис.3.2).

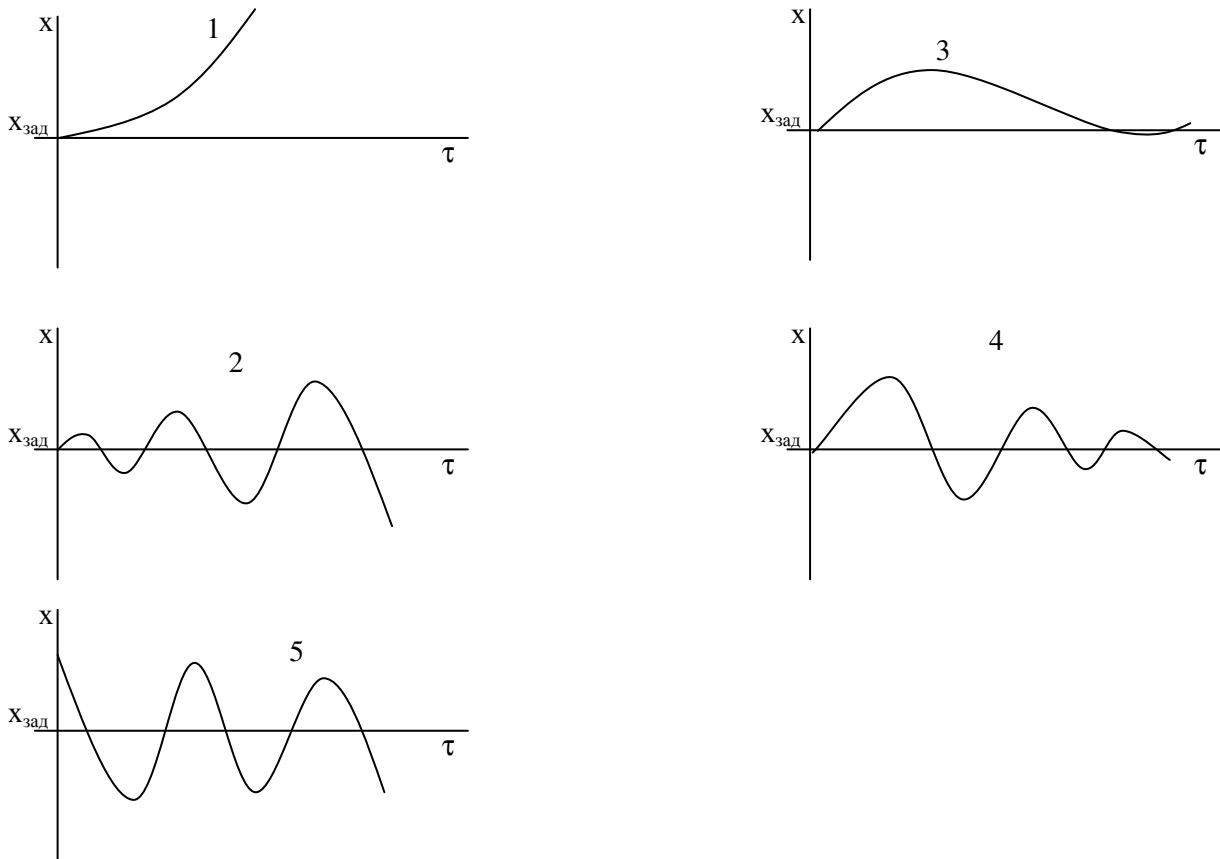


Рис.3.2 - Види перехідних процесів в системах управління:

- 1 – аперіодичний перехідний процес в нестійкій системі;
- 2 – перехідний процес з коливаннями в нестійкій системі;
- 3 – аперіодичний процес в стійкій системі;
- 4 – перехідний процес з коливаннями в стійкій системі;
- 5 – процес незгасаючими (стаціонарними) коливаннями.

### 3.3 Типові дії на об'єкт

Перехідний процес в системі управління може початися або під впливом збурюючих дій, або внаслідок зміни задаючої дії (тобто при налаштування системи на нове задане значення вихідної величини).

Для порівняння різних систем або оцінки їх придатності для вирішення конкретних завдань управління розглядають їх поведінку в динаміці. Вид перехідного процесу залежить не тільки від властивостей

власне системи, але і від характеру зміни прикладених дій. Тому в розгляд вводять *типові дії*, які є найбільш несприятливими або найбільш характерними серед всіх можливих.

1) Найчастіше як типову дію використовують стрибкоподібні функції, наприклад, ступінчаста дія – *одиничний стрибок* (Рис.3.2, а)

$$x = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0 \\ 1 & \text{при } t \geq 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

Такий сигнал є характерним для систем автоматичної стабілізації. Наприклад, при регулюванні швидкості і натягнення прокатної на стані смуги стрибкоподібні дії можуть виникати при раптовому включенні (відключенні) системи управління.

2) Іншою типовою дією є імпульсна (Рис.3.2, б). Ця дія виникає в системах різкою і значною зміною навантаження за час, значно менше часу перехідного процесу.

Як приклад можна вказати на стежачу систему, призначену для управління *летючими* ножицями в прокатному стані при розрізанні гуркоту на смуги.

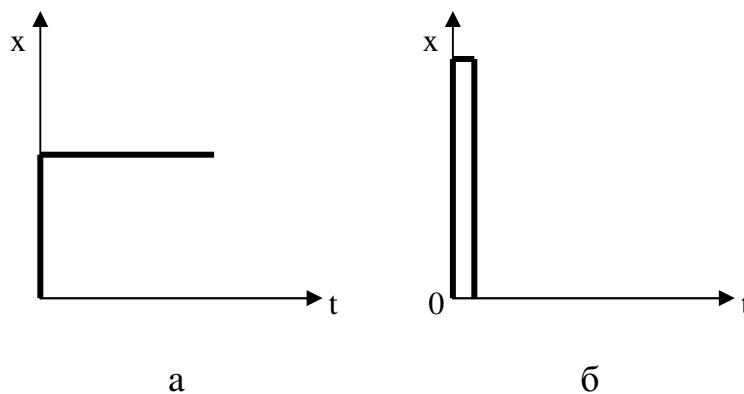


Рис.3.2 - Типові дії

3) Для систем, що працюють в умовах періодичних збурень, використовують гармонійні типові дії. Отримувані при цьому частотні характеристики дозволяють якнайповніше оцінити динамічні властивості системи.

### 3.4 Оцінка якості процесу управління

Практика використання систем управління пред'являє до них найрізноманітніші вимоги. Так, у багатьох випадках необхідно, щоб за строго певний час система переходила з одного стійкого стану в інше (швидкодія) або щоб система достатньо точно відтворювала задаючі дії (точність). До деяких САУ пред'являють вимоги економічності процесу управління, плавності зміни вихідних величин і тому подібне.

Комплекс вимог, що визначають поведінку системи в сталому і перехідному режимах при заданій дії, об'єднують в поняття *якості процесу управління*. Зрозуміло, що якість регулювання залежить від прийнятого алгоритму функціонування регулятора – закону регулювання.

Для оцінки якості управління використовується ряд числових показників. У статичному стані про якість управління судять по величині *статичної помилки*. У динамічних режимах якість систем оцінюється по характеру перехідного процесу.

Показники якості, визначувані безпосередньо по кривій перехідного процесу, називають *прямими оцінками якості*. Найчастіше прямі оцінки отримують по кривій *перехідної характеристики*  $h(t)$ , тобто по кривій перехідного процесу, викликаного одиничним ступінчастим сигналом за нульових початкових умов. Перехідна характеристика може бути отримана як для вихідної величини  $u(t)$ , так і для її відхилення  $\varepsilon(t)$  від заданого значення.

До *прямих оцінок якості* відносяться наступні показники (Рис.3.4) :

1. *Час регулювання*  $T_p$  – проміжок часу від моменту внесення дії до моменту, після якого регульована величина  $h(t)$  стає і залишається близькою до сталого значення  $h_{уст}$  із заданою точністю  $\Delta$ , тобто  $|h(t) - h_{уст}| \leq \Delta$ .

2. Час досягнення першого максимуму –  $t_{\max 1}$ .
3. Коливальність перехідного процесу визначається числом коливань  $\eta$ . Найчастіше допускається  $\eta = 1.2$ , іноді 3.4, але в деяких випадках коливання в системі недопустимі.
4. Частота коливань  $\omega_k = 2\pi/T_k$ , де  $T_k$  – період коливань.
5. Перерегулювання  $\sigma$  – виражене у відсотках максимальне відхилення регульованої величини від сталого значення

$$\sigma = \frac{h_{\max} - h_{\text{уст}}}{h_{\text{уст}}} 100\%. \quad (3.2)$$

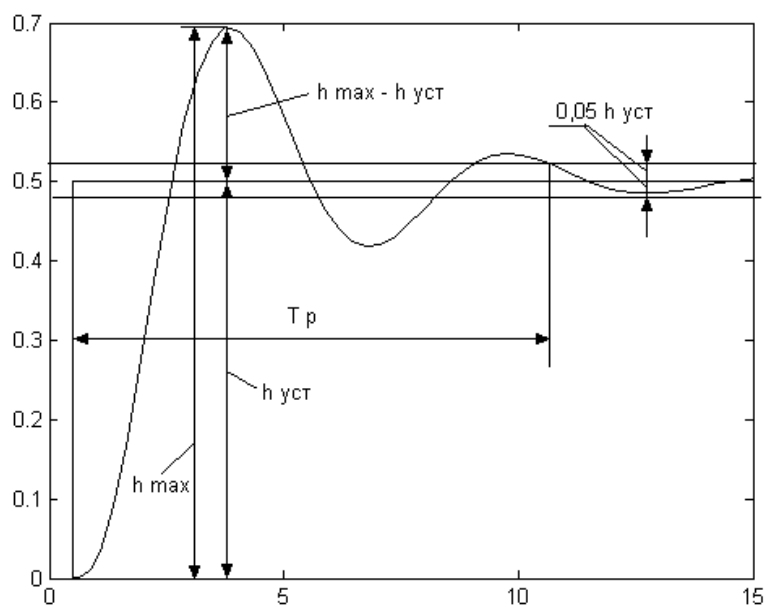
Звичайне перерегулювання не повинно перевищувати  $= 10 \dots 25 \%$ .

6. Декремент (швидкість) загасання коливань

$$\alpha = \frac{|h_{\max 1} - h_{\text{уст}}|}{|h_{\max 2} - h_{\text{уст}}|}. \quad (3.3)$$

Рис.3.4. До визначення прямих показників якості

Окрім прямих показників якості, для аналізу систем часто використовують *непрямі*, засновані на обчисленні певних інтегралів від



деяких функцій відхилення регульованої величини.

Найбільше застосування знаходять оцінки наступного

$$J_0 = \int_0^{\infty} \Delta y dt, \quad (3.4)$$

$$J_1 = \int_0^{\infty} \Delta y^2 dt, \quad (3.5)$$

де  $\Delta y(t) = y(t) - g(t)$  – відхилення регульованої величини  $y$  від заданого значення  $g(t)$ .

Якщо задане значення змінюється стрибком, то ідеалом перехідного процесу буде миттєве досягнення регульованою величиною нового значення. Показник якості при цьому – площа фігури між кривою перехідної характеристики і ідеальною (миттєвою) реакцією системи на ступінчасту дію, що цей перехідний процес. Очевидно, реальний процес тим менше відрізнятиметься від ідеального, чим менше буде сума абсолютних значень заштрихованих на рис.3.5 площ.

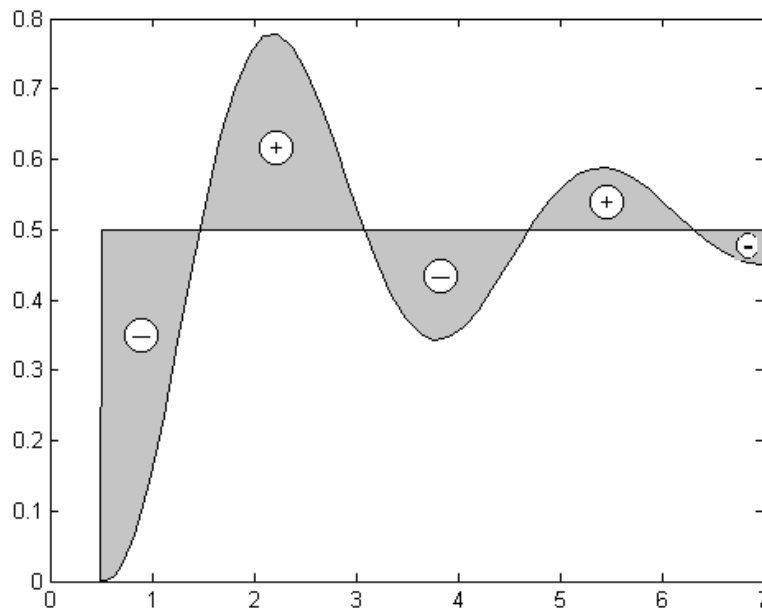


Рис.3.5. До визначення інтегральних показників якості

Отже, кращими якісними показниками будуть, за інших рівних умов, володіти системи, для яких значення інтегралів (3.4) і (3.5) мінімальні.

Інтеграл (3.4) є такою сумою площ, де окремі площі підсумовуються з різними знаками. Такий інтеграл може дати правильне уявлення про

перехідний процес тільки у разі монотонного аперіодичного процесу. Тому сфера його застосування обмежена.

Для оцінки коливальних перехідних процесів необхідно використовувати квадратичне інтегральне відхилення (3.5).

Такі непрямі інтегральні оцінки зазвичай застосовують для аналізу процесу вільних коливань, а також процесів, викликаних ступінчастою дією. Проте вони дозволяють враховувати і вплив збурень, що безперервно змінюються.

## **4 ФУНКЦІОНАЛЬНІ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ**

### **4.1 Призначення і види функціональних схем автоматизації**

Технологічний об'єкт управління (ТОУ) – це сукупність технологічного устаткування і технологічного процесу, який реалізований на цьому устаткуванні по відповідних технологічних інструкціях або регламентах.

Автоматизовані системи контролю і управління мають органічний зв'язок ТОУ, тому, перш ніж приступити до розробки систем управління, необхідно вивчити і описати склад устаткування технологічний процес і витікаючі з нього вимоги до систем автоматичного контролю і управління ТОУ. Ці вимоги доцільно оформити у вигляді таблиці з вказівкою вимірюваних параметрів, передбачуваних місць вимірювання, меж і точності вимірювання. Знання цих параметрів і їх характеристик необхідне надалі при виборі технічних засобів автоматизації.

Необхідно виявити також закони і критерії управління об'єктом, а також вимоги, що пред'являються до точності стабілізації, контролю і реєстрації технологічних параметрів, до якості регулювання. Якщо ТОУ не відповідає вимогам автоматизації, то висувають вимоги по його модернізації, зміні технологічної схеми.

Після вивчення і опису ТОУ, аналізу його особливостей і обґрунтування необхідних систем контролю і управління приступають до складання функціональної схеми автоматизації.



Управління будь-яким об'єктом включає виконання наступних функцій:

- отримання первинної технологічної інформації про ТОУ;
- обробку інформації за заздалегідь закладеними алгоритмами;
- рішення;
- виконання рішення (реалізація управляючих впливів на ТОУ).

Для реалізації перерахованих функцій необхідні відповідні технічні засоби. Розподіл системи на елементи по виконуваних ними функціях приводить до побудови функціональної схеми автоматизації. Така схема є основним проектним документом, що визначає характер побудови системи автоматичного контролю і управління ТОУ.

Систему автоматизації представляють у вигляді функціонально–блочних вузлів автоматичного контролю, управління і регулювання, що дають повне уявлення про оснащення об'єкту приладами і засобами автоматизації, включаючи обчислювальну техніку.

В процесі складання функціональної схеми вибирають методивимірювання технологічних параметрів; визначають основні технічні засоби автоматизації, що якнайповніше відповідають вимогам, що пред'являються, і умовам роботи ТОУ; вибирають виконавчі механізми, що приводять в дію регулюючі органи; визначають способи представлення інформації про стан технологічного процесу і устаткування; передбачають засоби автоматичного захисту, блокування і сигналізації.

#### **4.2 Позначення елементів автоматики**

Функціональну схему виконують у вигляді креслення, на якому в спрощеному вигляді схематично показують технологічне устаткування і розташовують прилади і засоби автоматизації в умовних зображеннях вказівкою зв'язків між ними.

Тому, перш ніж приступити до виконання схем автоматизації, необхідно вивчити основні умовні зображення приладів і засобів автоматизації і правила їх складання у ГОСТ 21.404–85 (ДСТУ21.404–85)[8].

складеної таким чином схеми автоматизації повинно бути ясно, де встановлені вимірники, виконавчі механізми і регулюючі органи. Вона повинна давати повне уявлення про принцип роботи у взаємодії із засобами автоматизації і служити для складання замовних специфікацій на прилади, засоби автоматизації і розробки креслень, що входять до складу проекту.

Функціональні схеми автоматизації зазвичай виконуються в розгорненому зображенні. Основні умовні позначення приладів і засобів автоматизації по ГОСТ 21.404–85 (ДСТУ) 21.404–85 приведені в таблиці П.2.1. Відборні і приймальні пристрої, що вбудовуються в технологічне устаткування і трубопроводи, на функціональних схемах не показують.

Для всіх типів вимірювальних перетворювачів (датчиків) і для приладів, що встановлюються по місцю, застосовується єдине графічне позначення у вигляді кола (у разі великого буквених позначень допускається застосовувати овал). Таке ж позначення, але розділене горизонтальною межею на дві рівні половини, застосовується для приладів, встановлених на щиті і . Прилади і засоби автоматизації, умовні позначення яких не представляється можливим побудувати за стандартом, допускається позначати довільними позначеннями розшифровкою їх на схемі.

Для отримання повного позначення приладу або засобу автоматизації в його графічне позначення у вигляді кола або овалу вписується буквене умовне позначення, яке визначає його призначення, виконувані функції, характеристику роботи. Необхідна інформація про прилад або засіб автоматизації позначається латинського алфавіту, які приведені в у ГОСТ 21.404–85 додаткових буквених позначень, що уточнюють вимірювані параметри і визначальні характеристики роботи приладів і засобів автоматизації.

У верхній частині кола проставляють буквені позначення вимірюваної величини і функціональної ознаки приладу, в нижній – позиційне позначення (цифрове або буквено-цифрове), що служить для нумерації елемента в схемі.

Порядок розташування буквених позначень виконують згідно ГОСТ 21.404–85. Відзначимо особливості окремих буквених позначень цієї таблиці.

Буква Е застосовується для позначення чутливих елементів, тобто пристроїв, що виконують первинне перетворення. Наприклад звужуючих пристрої витратомірів, термоелектричних перетворювачів (термопари), термоперетворювачі опору, датчики рівнемірів і тому подібне.

Буква Т застосовується для позначення проміжного перетворення з дистанційною передачею сигналу, наприклад, для позначення приладів з дистанційною передачею : безшкальних манометрів, дифманометрів і тому подібне. Буквою К позначаються станції управління, що входять до складу приладів.

Буква А застосовується для позначення сигналізації, незалежно від того, чи винесена сигнальна апаратура (арматура) на щит (), або вбудована в прилад. Буквами Н і L конкретизують граничні значення величин (відповідно, верхній і нижній рівень), що вимірюються.

Буквою S позначають конкретний пристрій, що виконує комутаційні функції (включення, відключення, блокування і тому подібне). Застосування резервних букв (В, N, О, Х, Z) має бути обумовлене на полі схеми.

Розглянемо принципи побудови буквених позначень приладів і засобів автоматизації по ГОСТ 21.404-85.

У верхній частині кола або овалу умовного графічного позначення приладів проставляються буквени позначення вимірюваної величини і функціональної ознаки приладу, в нижній – позиційне позначення цього приладу в конкретній схемі вимірювання, регулювання, сигналізації, управління.

Порядок розташування букв у буквенному позначенні наступний: основне позначення вимірюваної величини, додаткове позначення вимірюваної величини.

За наявності у прилада декількох використовуваних функціональних ознак вони повинні розташовуватися в наступній черговості: свідчення І,

реєстрація R, регулювання, управління C, включення, відключення, перемикач S, сигналізація A.

Необхідно пам'ятати, що в умовне позначення приладу входять буквені символи тих його функціональних ознак, які використовуються в даній конкретній схемі. Наприклад, якщо у показуючого і самописного потенціометра використовується тільки свідчення, то його позначають ТІ, а не ТІR. Якщо електронний безшкальний сигналізатор рівня має контактний пристрій і вбудовані сигнальні лампи, то залежно від функцій його позначають: LS– прилад застосовується тільки для включення (відключення) устаткування; LSA – для включення (відключення) і одночасно для сигналізації; LC – для регулювання рівня.

Функціональну схему автоматизації виконують, як правило, на одному листі. Складні технологічні схеми розчленовують на окремі технологічні вузли і виконують функціональні схеми цих вузлів у вигляді окремих креслень на декількох листах або на одному. Найменування схеми, відповідне її змісту, пишуть у штампі – в правому нижньому кутку креслення. Наприклад, «Регенеративний нагрівальний колодязь. Функціональна схема автоматизації». Над штампом розміщують таблицю умовних позначень, не передбачених стандартом. Над цією таблицею розташовують текст пояснення до схеми. Основні буквені умовні позначення вимірюваних величин і функцій, що виконуються приладом, проставляються на умовних зображеннях відповідних приладів.

Приклад побудови умовного позначення для вимірювання, реєстрації і автоматичного регулювання перепаду тиску приведений на Рис.4.1.

Перша буква в позначенні кожного приладу, що входить у комплект, або пристрою (окрім пристроїв ручного управління) є найменуванням вимірюваної комплектом величини або буквою Н для пристроїв, призначених для ручних операцій, незалежно від призначення комплекту, до складу якого вони входять.

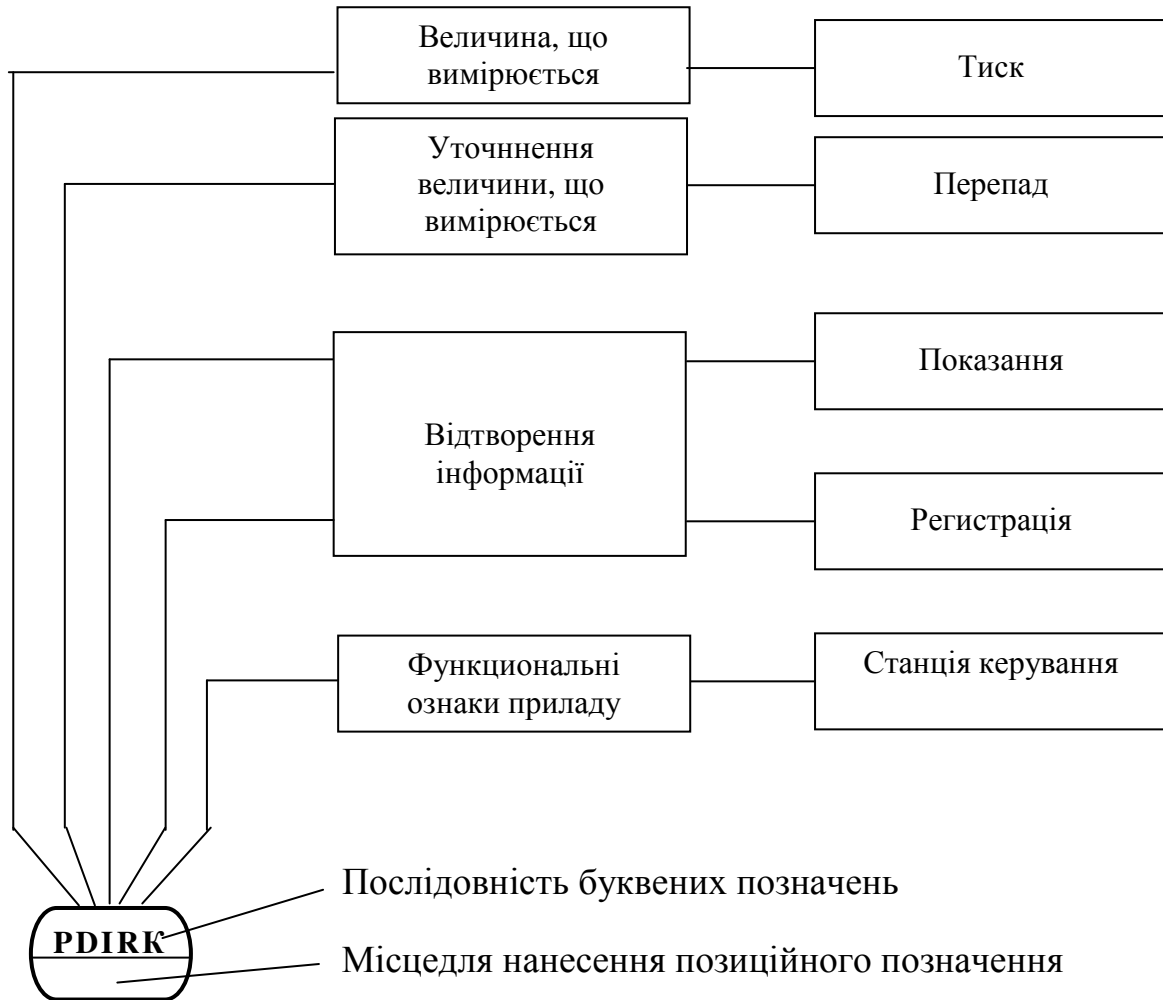


Рис.4.1. Приклад побудови умовного позначення приладу

Граничні значення вимірюваних величин, по яких здійснюється, наприклад, відключення, блокування, сигналізація, допускається конкретизувати додаванням букв Н і L, які наносяться праворуч від графічного зображення.

При необхідності конкретизації вимірюваної величини праворуч від графічного зображення приладу допускається указувати найменування або символ цієї величини, наприклад: «напруга» (U), «сила струму» (I), рН, O<sub>2</sub>, «вид радіоактивності» (α, β, γ). Для позначення величин, не передбачених стандартом, допускається використовувати резервні букви, які мають бути розшифровані.

Якщо буквою U позначають декілька різномірних величин, вимірюваних приладом, праворуч від позначення приводять розшифровку вимірюваних величин.

### 4.3 Принципи складання функціональних схем автоматизації

Схеми автоматизації є основними кресленнями, що представляють ідеологію побудови системи автоматичного контролю і управління технологічним процесом. Систему автоматизації на цих схемах представляють у вигляді функціональних блоків автоматичного контролю, управління і регулювання, що дають повне уявлення про об'єм автоматизації, включаючи обчислювальну і мікропроцесорну техніку. На схемі автоматизації зображають:

- технологічне устаткування, комунікації, органи управління;
- прилади і засоби автоматизації, а також зв'язки між ними;
- засоби телемеханіки, мікропроцесорної і обчислюваної техніки.

Технологічну схему викреслюють у верхній частині листа із спрощеним зображенням агрегатів в об'єм, що відображає характер технологічного процесу (без дотримання масштабу). Бажано, щоб конфігурація агрегату відповідала дійсною.

Технологічні трубопроводи (газопроводи, водопроводи, повітропроводи і ін.) на функціональній схемі позначають так, як вони показані на технологічній схемі, або однолінійно відповідно до умовних позначень за ГОСТ 2.786–70 і ГОСТ 2.786–70.

Для уточнення характеру середовища до цифрового позначення додають буквенний індекс, наприклад, вода чиста – 14, пара перегріта – 2П, пара насичена – 2Н і тому подібне. Умовні цифрові позначення трубопроводів проставляють через відстані не менше 50 мм.

Трубопроводи для рідин і газів, не передбачених таблицею П.2.5, позначають подальшими цифрами з обов'язковими поясненнями на кресленні нових умовних позначень. Якщо позначення трубопроводів на технологічних кресленнях не стандартизовані, то на функціональних схемах застосовують умовні позначення, прийняті в технологічних кресленнях.

Біля зображення технологічного устаткування та окремих його елементів і трубопроводів проставляють відповідні пояснюючі написи

(найменування технологічного устаткування, його номер і тому подібне). Напрямок потоку показують стрілками.

На трубопроводах, де передбачається установка пристроїв і регулюючих органів, вказують діаметри умовних проходів.

На технологічному устаткуванні і комунікаціях умовними позначеннями показують основні запорні і регулюючі органи, що необхідне для визначення відносного розташування відборів сигналів або з'ясування необхідності вимірювань.

Технологічне устаткування і комунікації автоматизуємого об'єкту на функціональних схемах відтворюються з таким ступенем деталізації, яка дозволяє показати їх взаємне розташування і взаємодію з приладами, засобами автоматизації і обчислювальною технікою.

Другорядні конструктивні деталі і технологічні комунікації, а також елементи об'єкту, не пов'язані з автоматизацією і не роз'яснюють принцип його роботи, не показуються.

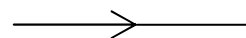
Технологічне устаткування і комунікації зображаються суцільними тонкими лініями, технологічні потоки виділяються жирнішими лініями. Допускається зображати елементи об'єкту у вигляді прямокутників, які мають бути забезпечені відповідними найменуваннями. Окремі елементи об'єкту можуть зображатися окремо один від одного з посиланнями на їх взаємозв'язок.

Лінії зв'язку між приладами і засобами автоматизації зображають однією тонкою суцільною лінією незалежно від фактичного числа прокладених проводів або труб. Підведення ліній зв'язку до символу приладу можна здійснювати в будь-якій кола (зверху, знизу, збоку). Лінії зв'язку виконують по найкоротшій відстані з можливістю зображення устаткування і трубопроводів.

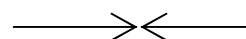
Зображень об'єкту і трубопроводів мають бути пояснюючі написи, а також стрілками вказаний напрям руху потоків (по ГОСТ 2.721–74):

– електричного:

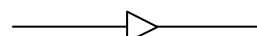
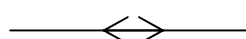
у одному напрямі



у двох напрямках одночасно



у двох напрямках не одночасно



– пневматичного

– гідравлічного

Допускається на лініях зв'язку указувати вид електричного сигналу.

У разі функціональної взаємодії (з'єднання) ліній зв'язку в місці перетину проставляють крапку. Лінії зв'язку повинні чітко відображати функціональні зв'язки приладів (елементів) від початку проходження сигналу (дії) до кінця. При необхідності вказівки напряму передачі сигналу на лініях зв'язку наносять стрілки.

Для складних об'єктів з великим числом вживаних приладів і засобів автоматизації, коли зображення безперервних ліній утрудняє читання схеми, передбачають їх розрив. При цьому обидва кінці ліній зв'язку в місцях розриву нумерують однією і тією ж арабською цифрою. Нумерацію розриву ліній зв'язку виносять на основні базові лінії, забезпечуючи мінімальний перетин ліній зв'язку із зображенням технологічного устаткування і комунікацій. Величину розриву для всіх ліній зв'язку роблять однаковою, з таким розрахунком, щоб нумерація зверху і знизу проставлялася відповідно на одному рівні. Нумерацію ліній зв'язку починають з лівого боку щитів в порядку зростання номерів.

При виконанні функціональних схем показують добірні пристрої, первинні і вторинні вимірювальні прилади, перетворювачі, обчислювальні пристрої, перемикачі, виконавчі механізми, регулюючі органи, апаратуру управління, комплектні пристрої, елементи сигналізації, блокування і ін.

Допоміжні пристрої і апаратуру допоміжного призначення (фільтри, редуктори, сполучні коробки, джерела живлення, реле, магнітні пускачі, запобіжники, вимикачі в ланцюгах живлення і так далі) не показують.

Місця відбору імпульсів і приймальні пристрої, що вбудовуються в трубопроводи і устаткування (ртутні термометри, термометри опору, пірометри, вимірювальні діафрагми, лічильники, манометри і ін.) викреслюють на зображеннях комунікацій або устаткування. Пристрої, механічно пов'язані з конструкціями, вбудованими в комунікації агрегату, (виконавчі механізми, механізми, пов'язані з органами, що дроселюють) зображаються на кресленні поблизу цих конструкцій.



Прилади і засоби автоматизації, що вбудовуються в технологічне устаткування і комунікації або механічно пов'язані з ними, зображають на схемі в безпосередній близькості до технологічного устаткування. До них відносяться: термометри розширення, термометри термоелектричні (термопари), термометри опору, датчики пірометрів, що звужують вимірювальні пристрої, ротаметри, газові і рідинні лічильники, датчики індукційних витратомірів, датчики рівнемірів, датчики радіоактивності, щільність і ін., виконавчі механізми, регулюючі і замочні органи.

Прилади і засоби автоматизації, розташовані на щитах, , показують в прямокутниках, що зображають щити, . За допомогою прямокутників зображають також агреговані комплекси, машини централізованого контролю, обчислювальні машини, що управляють, і тому подібне. Прямокутники розташовують в нижній третині поля схеми в одному або декількох горизонтальних рядах і в такій послідовності, при якій досягається найбільша простота і ясність схеми. У кожному прямокутнику з лівого боку указують відповідне найменування.

Прилади і засоби автоматизації, які розташовані поза щитами і конструктивно не пов'язані безпосередньо з технологічним устаткуванням і комунікаціями (вторинні прилади, інформаційні табло, проміжні підсилювачі і тому подібне), умовно показують в прямокутнику «Прилади місцеві», який розташовують над прямокутниками щитів. Порядок побудови прямокутників приведений в таблиці 4.1.

Місця входу і виходу сигналів на прямокутник відповідних пристроїв автоматики, обчислювальних машин, що управляють, і агрегованих комплексів позначають колами діаметром 1,5...2 мм.

Для вказівки на функціональній схемі прийнятої системи контролю і управління об'єктом, а також місця установки апаратури (датчиків, вимірювальних приладів і допоміжного устаткування) в нижній частині креслення викреслюють прямокутники, щити, що умовно зображають пульти, а також пункти контролю і управління, в яких показують умовними позначеннями відповідну апаратуру. Прямокутники розташовують зверху вниз в наступному порядку: прилади місцеві; місцеві

щити управління; центральний щит; диспетчерський щит або пульт; обчислювальні машини, що управляють.

Під нижнім прямокутником наносять гранку «вимірюваний (регульований) параметр».

При виконанні функціональної схеми із зображеннями пристроїв автоматики, розташованими в прямокутниках, зв'язок цих елементів з елементами, розташованими на технологічному устаткуванні і комунікаціях, виконують суцільними сполучними лініями, однаковими для трубних і електричних зв'язків.

Таблиця 4.1 – Схема побудови написів  
у прямокутниках розміщення засобів автоматизації

<i>Прилади місцеві</i>						
<i>Щити</i>						
<i>Пульт управління</i>						
<i>Пристрій, що управляє</i>						
<i>Інформаційний обчислювальний комплекс</i>						
<i>Вимірюваний (регульований) параметр</i>						

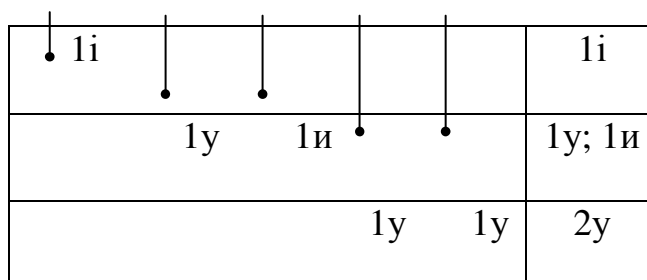
Ці лінії слід проводити з найменшим числом перегинів і перетинів. Не допускається перетин сполучними лініями умовних позначень приладів.

На сполучних лініях поблизу верхнього прямокутника вказується максимальне значення вимірюваного параметра і одиниці вимірювання. При умовному зображенні вимірювальних приладів на трубопроводах або устаткуванні сполучні лінії відсутні. В цьому випадку максимальні значення вимірюваних параметрів вказують під номером приладу або поряд ним. Сполучні лінії від різних приймальних пристроїв, що працюють з одним вимірювальним приладом, об'єднують і однією лінією на перемикач або до приладу.

У складних схемах при великому числі сполучних ліній, що утрудняють читання креслення, функціональну схему виконують адресним способом. При цьому сполучні лінії розривають. Залишають невеликі відрізки ліній (40...80 мм), що відходять від пристроїв до апаратури, позначеної в прямокутниках на нижній частині креслення. З'єднанні лінії нумеруються арабськими цифрами. Цифри адреси верхніх і нижніх відрізків сполучних ліній розташовують, відповідно, на одному рівні. Нижню частину відрізків сполучних ліній нумерують у наростаючій послідовності зліва направо. Довжину нижнього відрізка вибирають в межах 40.80 мм.

Точки входу і виходу сигналів усередині прямокутників відповідних блоків показують колами діаметром 1,5...2 мм. Поряд колами кількість і умовне позначення використовуваних каналів: *p* – канал регулювання, *i* – інформаційний, *y* – канал, що управляє. Число каналів у кожному блоці вказують в окремій графі у правій частині прямокутника.

Наприклад –



Всім засобам автоматизації, зображеним на функціональній схемі, надають індекс (номер позиції), який зберігається у всіх матеріалах проекту. Індекс дають кожному комплекту апаратури, за комплект апаратури вважають ряд функціонально зв'язаних елементів, що виконують певне завдання. Наприклад, комплект апаратури для вимірювання витрати: діафрагма, дифманометр, вимірювальний прилад – мають один загальний номер позиції.

Індекс може складатися з цифри, якщо в комплект апаратури входить тільки один елемент (місцевий манометр, термометр і так далі), або з цифри з буквою, якщо в комплекті апаратури декілька елементів.

Номер позиції комплекту позначають арабськими цифрами, а для позначення окремих елементів апаратури до арабської цифри додають буквенний індекс кирилиці. Буквенний індекс дають у послідовності передачі сигналів і командної інформації. Наприклад, «вимірювальна діафрагма 3а», «конденсаційна судина 3б», «дифманометр 3в», «витратомір 3г» і так далі\

Привласнення позиційних позначень функціональним групам, а також окремим приладам і засобам автоматизації рекомендується проводити зліва направо в наступній послідовності:

- температура;
- тиск, розрідження, перепад тиску;
- витрата і кількість;
- рівень;
- склад і якість речовини;
- інші параметри.

#### **4.4 Структурні схеми контролю і управління основних теплотехнічних параметрів**

У промисловості існує велика різноманітність агрегатів для різних видів теплової обробки матеріалів. Спільність їх головного призначення (отримання теплоти і передача її матеріалу) приводить до того, що ряд вузлів систем автоматичного управління різними агрегатами служить для виконання однакових функцій. У свою чергу, спільність виконуваних

функції приводить до одноманітності як структурної, так і апаратної побудови вузлів регулювання.

Більшість об'єктів управління оснащуються так званими типовими вузлами систем автоматичного контролю і регулювання. Розуміння їх роботи і правил складання полегшує складання схеми автоматизації ТООУ в цілому. Тому нижче приведено перелік типових вузлів системи автоматизації і опис їх принципу дії.

Найбільш розповсюдженими у системах автоматичного управління роботою теплових агрегатів є наступні вузли:

- регулювання температури;
- регулювання співвідношення «паливо – повітря», тобто регулювання процесу горіння;
- регулювання тиску в робочому просторі агрегату;
- автоматичне блокування, сигналізація падіння тиску газу, повітря, води і тому подібне.

#### ***4.4.1 АСР температури в печі***

Автоматичне регулювання температурного режиму є, як правило, основним завданням системи автоматики металургійної печі. Рівень температури у печі визначають теплопередачу до металу, швидкість його нагріву, розподіл температури у масі металу, інтенсивність окаліноутворення і інші важливі параметри роботи агрегату.

Якісне регулювання температури в робочому просторі печі припускає вибір представницької точки контролю, правильну установку вимірювача температури, правильного регулятора і регулюючого органу.

Динамічні характеристики ОР залежать від способу вимірювання температури. Можна виділити два основні способи контролю цього параметра:

- 1) термопарою або пірометром, що візується на поверхню футерування;
- 2) пірометром, що візується безпосередньо на факел або, через факел, на стінку печі або метал.

Вибір способу вимірювання температури визначається теплотехнічними, метрологічними і конструктивними вимогами. Кількісні характеристики перехідних процесів істотно залежать від режиму роботи печі [3, С.175]. У будь-якому випадку передаточну функцію по каналу регулювання можна апроксимувати виразом (4.1). Значення параметрів регулювання приведені в таблиці. 4.2.

Функціональна схема типової температури АСР в робочому просторі теплового агрегату представлена на Рис.4.2.

Температуру в робочому просторі теплового агрегату вимірюють датчиком температури 1а, що перетворює теплоту в електричний сигнал, який передається на вторинний показуючий і реєструючий прилад 1б. З вихідного датчика–перетворювача вторинного приладу 1б сигнал, пропорційний дійсному значенню температури, поступає на перший вхід регулятора температури 1в, на другий вхід якого поступає сигнал, **пропорційний** заданому значенню температури з виходу **здатчика 1г**.

Таблиця 4.2 – Параметри **передаточної** функції об'єкту регулювання по каналу температури

Спосіб вимірювання температури	<b>k</b>	<b>T</b>	<b><math>\tau</math></b>
	°C / % ходу РО	с	с
Термопара у захисній арматурі	4,8...5,1	75...80	27...29
Пірометр, що візується на стінку печі	4,8...5,1	35...40	12...15
Пірометр, що візується на факел, що світиться	10...12	4,5...5,0	1,0...1,5

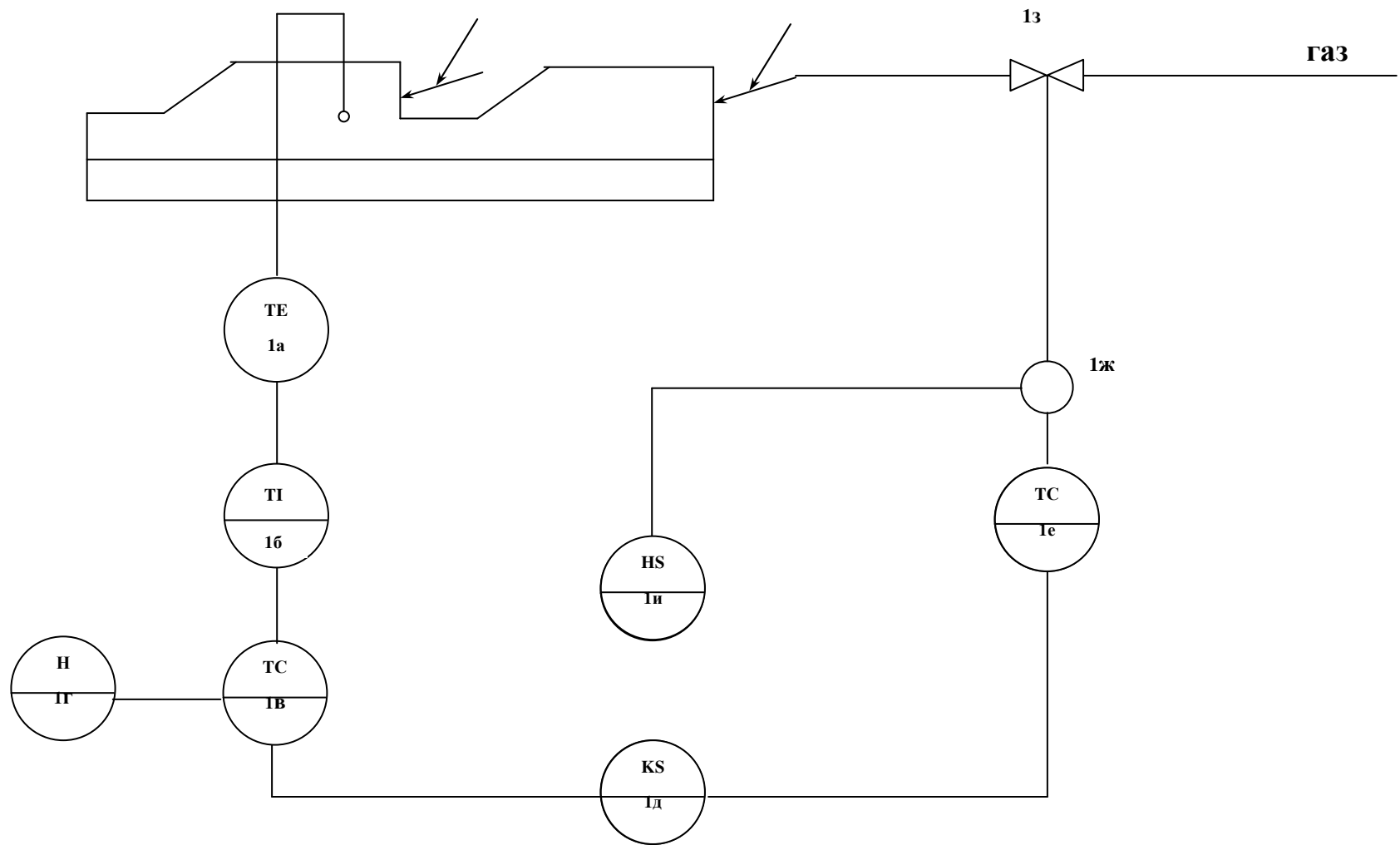


Рис. 4.2 Функціональна схема автоматичної системи регулювання (АСР) температури у печі

Температуру в робочому просторі теплового агрегату вимірюють датчиком температури 1а, що перетворює теплоту в електричний сигнал, який передається на вторинний показуючий і реєструючий прилад 1б. З вихідного датчика–перетворювача вторинного приладу 1б сигнал, пропорційний дійсному значенню температури, поступає на перший вхід регулятора температури 1в, на другий вхід якого поступає сигнал, пропорційний заданому значенню температури з виходу датчика 1г.

При відхиленні дійсного значення температури від заданого регулятор 1в формує дію, що управляє згідно ухваленому закону регулювання. Дія, що управляє, через блок ручного управління 1д і підсилювач потужності 1е поступає на виконавчий механізм 1ж, що змінює положення регулюючого органу 1з, встановленого на газопроводі. Зміна положення регулюючого органу 1з, а отже, і зміна витрати палива відбуватиметься до тих пір, поки не відновиться рівність між дійсним і заданим значеннями температури у межах точності роботи системи.

У разі виходу з ладу регулятора температури, за допомогою блоку ручного управління 1д здійснюється переведення системи з автоматичного режиму роботи на ручній і дистанційне ручне керування виконавчим механізмом. Контроль положення валу виконавчого механізму, а отже, і положення регулюючого органу здійснюється дистанційним покажчиком положення 1и, на вхід якого поступає сигнал від спеціального датчика, розташованого у виконавчому механізмі. Дистанційний вказівник положення допомагає контролювати роботу і наладку АСР температури, а також дозволяє орієнтуватися при ручному дистанційному керуванні виконавчим механізмом.

#### ***4.4.2 АСР тиску в робочому просторі печі***

Режим тиску в робочому просторі теплотехнічного агрегату, наприклад, нагрівальної печі, в значній мірі впливає на температурний режим печі і якість нагріву металу. У загальному випадку тиск необхідно підтримувати таким, щоб звести до мінімуму втрати тепла через нещільність печі і виключити підсмоктування навколишнього повітря. У полум'яних нагрівальних і термічних печах раціональна підтримка



нульового тиску на рівні череня печі (металу, що нагрівається). В цьому випадку істотно знижується забруднення навколишнього середовища, знос зовнішніх конструкцій печі, чад металу, поліпшуються умови обслуговування агрегату.

Якісне регулювання тиску в робочому просторі печі припускає вибір представницької точки контролю, правильний вибір регулятора і регулюючого органу ([3], С.172–174). Конструкція і місце установки відбірного пристрою повинні виключати спотворення величини статичного тиску, занесення і засмічення імпульсних трас. ПЧ по каналу тиск є малоінерційним об'єктом. Значення параметрів передаточної функції приведені в таблиці. 4.3.

Слід вказати, що кількісні характеристики перехідних кривих істотно залежать від режиму роботи печі. Функціональна схема типової АСР тиску в робочому просторі теплового агрегату представлена на рис.4.3.

Таблиця 4.3 – Параметри передаточної функції об'єкту регулювання по каналу тиску

Параметр	Розмірність	Величина
Коефіцієнт передачі, k	Па / % ходу РО	0,2...0,8
Постійна часу, T	с	2,2...4,5
Час чистого запізнювання,	с	0,6...0,9

Вимірюваний тиск від добірного пристрою за допомогою імпульсної траси передається дифманометру 1а. З одного з вихідних датчиків–перетворювачів дифманометра 1а електричний сигнал, пропорційний поточному значенню тиску, поступає на вторинний показуючий прилад 1б. З іншого датчика–перетворювача дифманометра 1а сигнал поступає на перший вхід регулятора тиску 1в, на другий вхід якого поступає сигнал, пропорційний заданому тиску з виходу задатчика 1г.

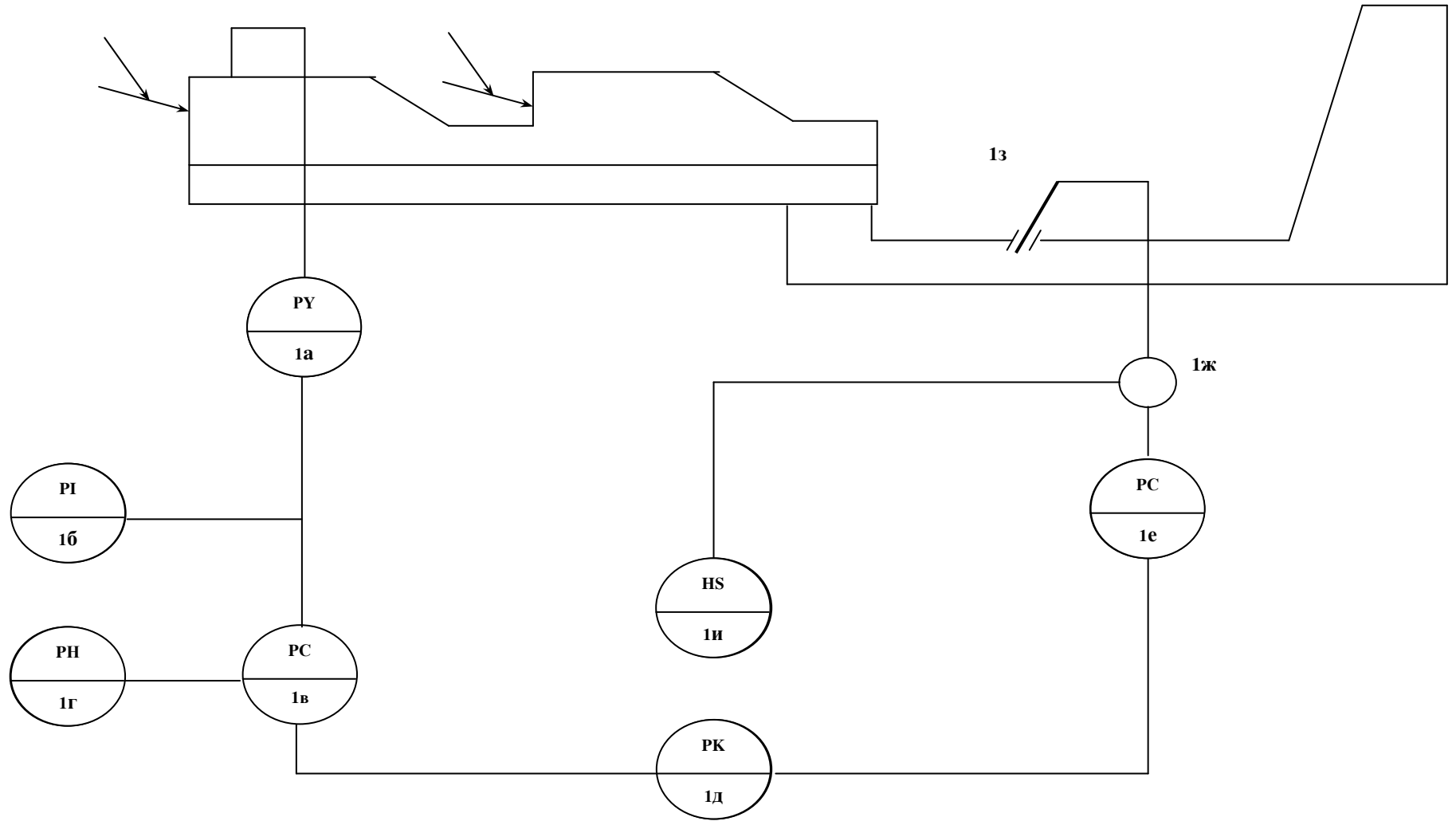


Рис.4.3. Функціональна схема типової АСР тиску

При відхиленні поточного значення тиску від заданого регулятора 1в формується дія, що управляє, яка через блок ручного управління 1д і безконтактний реверсивний пускач 1е передається виконавчому механізму 1ж. Виконавчий механізм 1ж переміщує регулюючий орган 1з, встановлений у борові. Переміщення шибера 1з, а отже, і зміна гідравлічного опору димовідвідного тракту агрегату відбуватиметься до тих пір, поки не відновиться задане значення тиску. Положення шибера 1з контролюється дистанційним покажчиком положення 1и. Вибір роду управління (дистанційне ручне або автоматичне) здійснюється за допомогою блоку ручного управління 1д.

#### 4.4.3 АСР співвідношення «паливо-повітря»

Автоматичне регулювання співвідношення витрат палива і повітря, що подаються у піч, повинне забезпечувати необхідні умови спалювання палива. У загальному випадку умови спалювання палива повинні забезпечити необхідну атмосферу в печі, економічність спалювання, а також якнайкращі умови теплообміну факела з металом і кладкою.

Чисельне співвідношення «паливо-повітря» характеризується коефіцієнтом витрати повітря ( $\alpha$ ), визначуваного виразом

$$\alpha = F_v / (V^0_v \cdot F_T), \quad (4.1)$$

де  $F_v$  – дійсна витрата повітря;  $V^0_v$  – теоретична витрата повітря, необхідна для повного спалювання одиниці палива;  $F_T$  – витрата палива.

При побудові АСР співвідношення «паливо-повітря» передбачається, що величини  $\alpha$  і  $V^0_v$  відомі. Тоді з формули (4.1) маємо наступне співвідношення між витратою повітря і палива

$$F_v / F_T = (\alpha \cdot V^0_v). \quad (4.2)$$

При регулюванні співвідношення «паливо-повітря» у більшості випадків провідним потоком є газ, витрата якого визначається регулятором температури, веденим потоком – повітря. В деяких випадках застосовується зворотна схема, в якій провідний потік – повітря, а ведений

– паливо. У назві АСР після слова «співвідношення» **указується** спочатку ведучий, а потім **ведений** потоки.

Печі по каналу співвідношення «**паливо–повітря**» є малоінерційними об'єктами. Кількісні значення параметрів **передаточної** функції визначаються типом печі і режимом роботи. Значення **параметрів передаточної** функції приведені в таблиці 4.4.

На рис.4.4 приведена функціональна схема типової автоматичної системи регулювання співвідношення «**паливо–повітря**».

Витрата **палива** (газу) і повітря вимірюються за допомогою звужуючих **пристроїв 1а і 2а**, перепади **тиску** з яких передаються на диференціальні **манометри–витратоміри 1б і 2б**. З електричних виходів датчиків **дифманометрів** сигнали, **пропорційні** перепадам **тиску**, подаються на блоки **виизначення** квадратного кореня **1в і 2в**, на виході яких **отримують** електричні сигнали, **пропорційні** витратам газу і повітря. які фіксуються **вторинними** показуючими і реєструючими приладами **1г і 2г**.

Таблиця 4.4 – Параметри **передаточної** функції об'єкту регулювання по каналу співвідношення «**паливо–повітря**»

Параметр	Розмірність	Величина
Коефіцієнт передачі, k	тис. м <sup>3</sup> /% ходу РО	0,02...0,25
Постійна часу, T	с	0,5...0,8
Час чистого запізнювання	с	0,2...0,3

Витрата **палива** (газу) і повітря вимірюються за допомогою звужуючих **пристроїв 1а і 2а**, перепади **тиску** з яких передаються на диференціальних **манометри–расходомеры 1б і 2б**. З електричних виходів датчиків **дифманометров** сигнали, **пропорційні** перепадам **тиску**, подаються на блоки **витягання** квадратного кореня **1в і 2в**, на виході яких

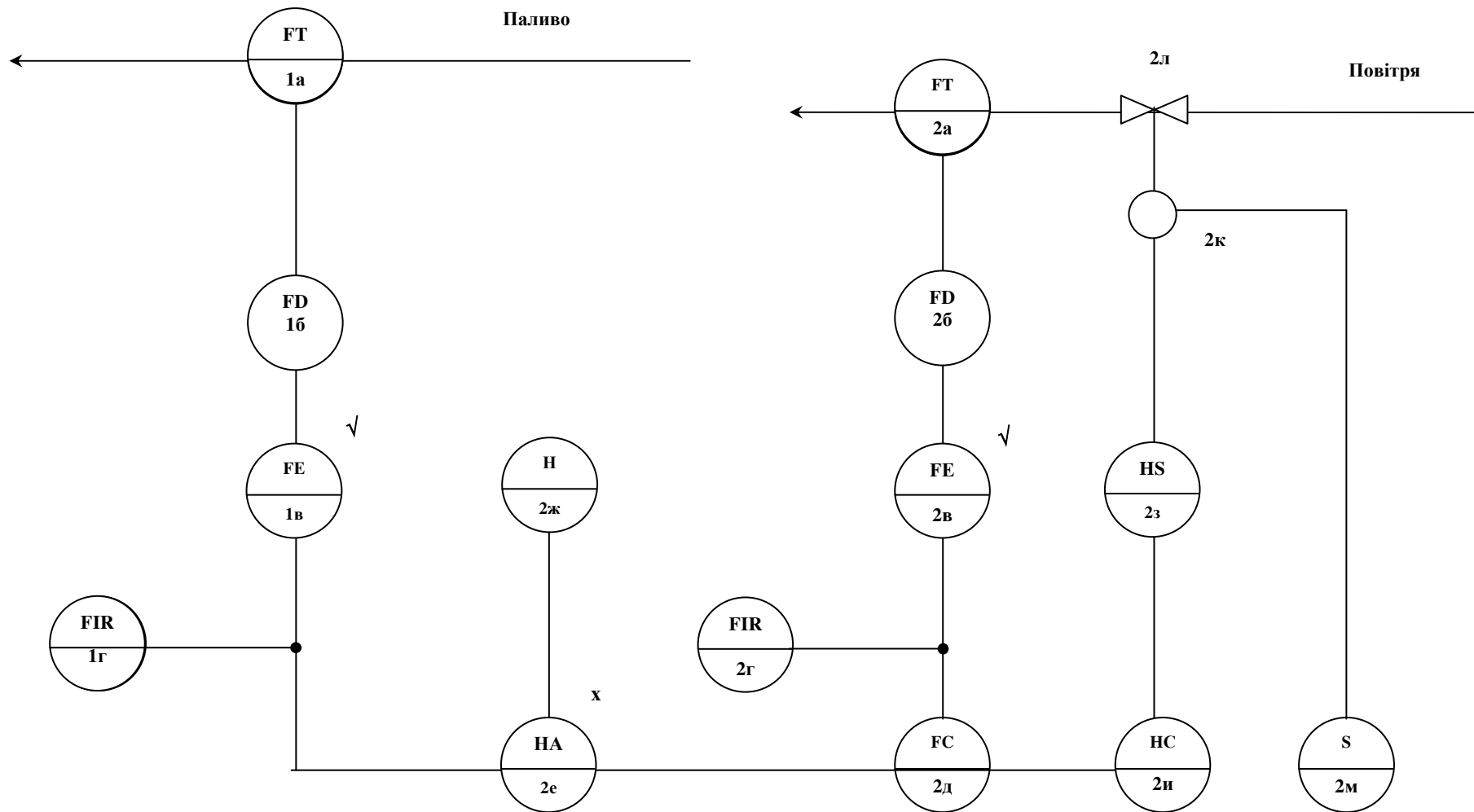


Рис. 4.4. Функціональна схема типової автоматичної системи регулювання співвідношення «паливо-повітря»

отримують електричні сигнали, пропорційні витратам газу і повітря. які фіксуються вторинними показуючими і реєструючими приладами 1г і 2г.

Сигнал, пропорційний поточній витраті палива, поступає на перший вхід блоку множення 2е, на другий вхід якого подається сигнал з виходу задатчика 2ж, пропорційний заданому значенню коефіцієнта витрати повітря  $\alpha$ . Таким чином, на виході блоку множення 2е, згідно виразу (4.2), забезпечується отримання сигналу, пропорційного заданій витраті повітря

$$F_{ов} = \alpha \cdot V_{ов} \cdot F_T \quad (4.3)$$

Цей сигнал з виходу блоку множення 2е поступає на перший вхід регулятора співвідношення 2д, на другий вхід якого подається сигнал з функціонального блоку 2в, який пропорційний поточній витраті повітря. При його відхиленні від заданого значення, тобто від заданого співвідношення витрат газу і повітря, регулятор 2д через безконтактний реверсивний пускач 2и, виконавчий механізм 2к і регулюючий орган 2л здійснює зміну витрати повітря до тих пір, поки не буде досягнуто задане співвідношення «паливо–повітря».

У разі виходу з ладу регулятора цього співвідношення за допомогою блоку ручного управління 2з здійснюється переведення системи з автоматичного режиму роботи на ручній і дистанційне ручне керування виконавчим механізмом 2к. Для контролю положення його валу і, отже, положення регулюючого органу в систему включені дистанційний показчик положення 2м, що працює від спеціального датчика, розташованого у виконавчому механізмі. Він допомагає контролювати роботу і наладку АСР співвідношення «паливо–повітря», а також дозволяє орієнтуватися при ручному дистанційному управлінні виконавчим механізмом.

#### **4.4.4 Автоматичний захист і сигналізація**

АСР теплового режиму агрегату передбачає аварійне відключення подачі газу при падінні тиску газу і повітря нижче за допустиму межу. Падіння тиску газу або повітря фіксується сигналізаторами падіння тиску, відповідно, 1а і 2а (рис.4.5), які своїми контактами включають світлову

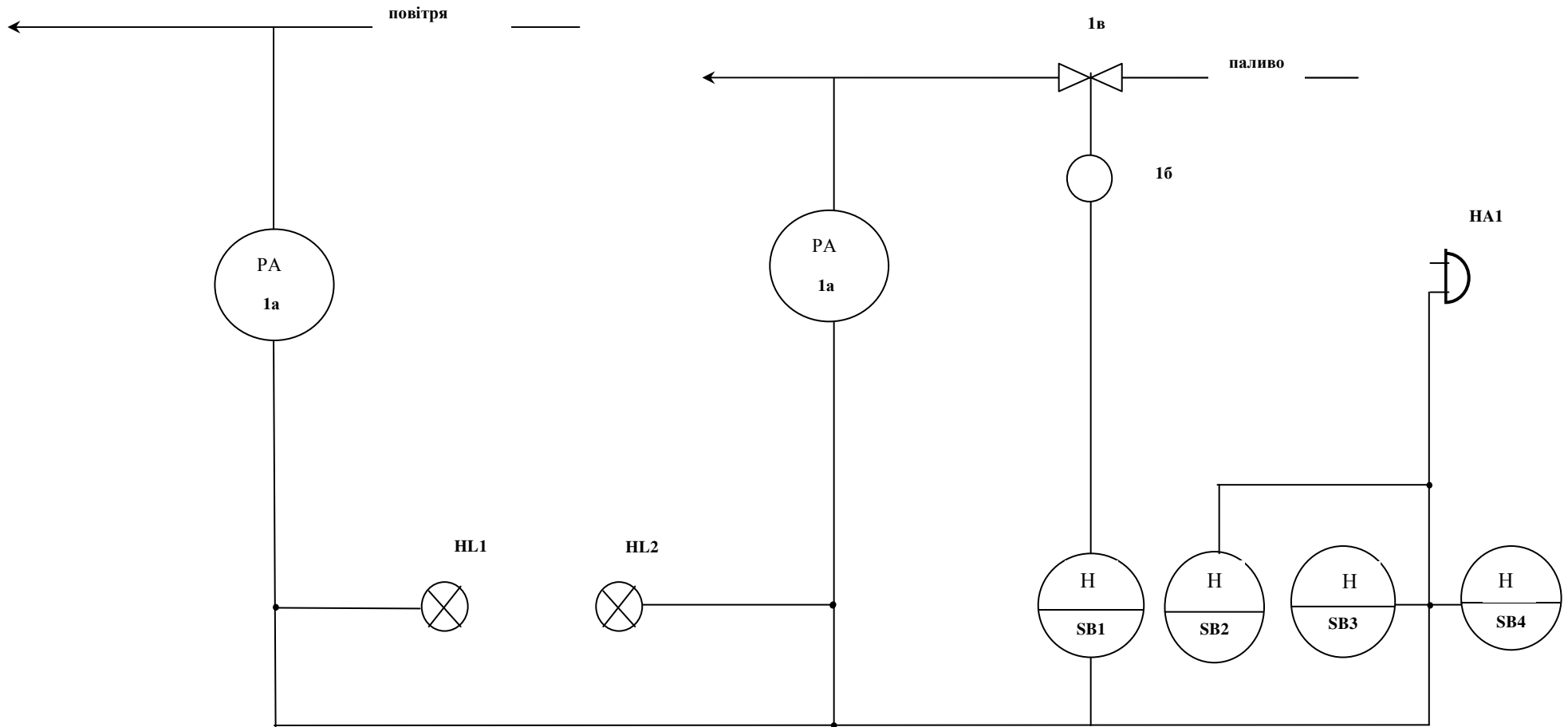


Рис.4.5. Функціональна схема автоматичного блокування і сигналізації

HL1, HL2 і звукову НА сигналізацію, а також розривають ланцюг живлення електромагніта 16 при газовому відсічному клапані 1в. При цьому лінія подачі стислого повітря у відсічній клапан перекривається, а сама лінія сполучається з атмосферою. Тиск в лінії падає і під дією пружини відсічний клапан закривається, що призводить до припинення подачі газу в агрегат.

Після відновлення нормального тиску газу (повітря) включення подачі повітря здійснюється кнопкою SB1. При цьому подається живлення на електромагніт 16 і лінія подачі стислого повітря відключається від атмосфери. Стисле повітря подається у відсічній клапан, який відкривається, і подача палива в агрегат відновлюється. Звуковий сигнал знімається кнопками SB2 і SB3. Кнопка SB4 служить для перевірки цього сигналу.



## 5 ПРИНЦИПИ І РЕЖИМИ УПРАВЛІННЯ

Все різноманіття систем управління засновано на трьох фундаментальних принципах. Ці загальні принципи застосовують для управління **не тільки** технічними, але і будь-якими іншими об'єктами: біологічними, соціальними, інтелектуальними і ін.

Фундаментальні принципи розрізняються видом **початкової** інформації і способом її використання для управління об'єктом.

### 5.1 Принцип розімкненого управління (за завданням)

Принцип розімкненого управління полягає в тому, що дія  $v(t)$ , що сигнал, що управляє, формується автоматичним пристроєм (АП) на підставі інформації тільки про задане значення  $g(t)$  – уставці величини  $y(t)$

$$v = f(g(t)). \quad (5.1)$$

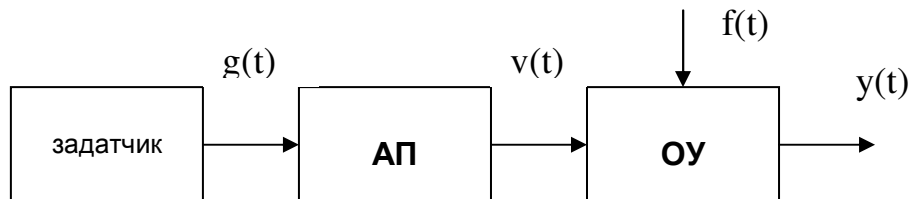


Рис.5.1. Схема розімкненого управління

Схема управління при цьому має вид розімкненого ланцюжка (Рис.5.1), в якому автоматичний (що управляє) пристрій приводиться в дію спеціальним задаючим пристроєм (здатчиком) і впливає на об'єкт управління так, щоб значення керованої величини було рівне або близько до заданої.

Як видимий, алгоритм управління не пов'язаний ні з виходом об'єкту, ні зі збуреннями, що діють на нього. Розімкнений ланцюг далеко не завжди забезпечує необхідну точність виконання алгоритму функціонування, особливо при значних збуреннях, під дією яких вихідна величина може помітно відхилитися від заданої.

Як приклад використання даного принципу можна розглянути таке управління нагрівальною піччю, при якому по відомій методиці розраховують витрату газу, що забезпечує при деяких заданих (базових) параметрах процесу (тиск в газопроводі, теплотворна здатність газу, температура повітря, що подається, і тому подібне) досягнення необхідної температури в печі.

Потім встановлюють запірну арматуру на газопроводі в положення, що відповідає цьому розрахунковому значенню. На цьому процес управління закінчується. Очевидно, що будь-яке відхилення параметрів процесу нагріву від базових значень приведе до відповідного відхилення температури печі від заданої.

Та все ж, не дивлячись на очевидні недоліки, розімкнене управління, завдяки своїй простоті, використовується достатньо широко для вирішення простих завдань автоматизації (сигналізація, контроль, пуск і зупинка агрегатів). По розімкненому циклу працюють торгові автомати, автоматичні верстатні лінії і ін.

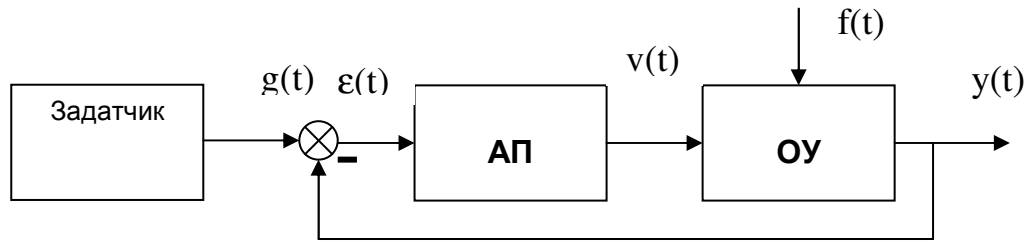
Загальним для таких систем є те, що виконання завдань не контролюється, збурення не вимірюються і не використовуються для вироблення дій, що управляють.

## 5.2 Управління по відхиленню (принцип зворотного зв'язку)

Цей принцип є одним з найбільш ранніх і широко поширених принципів управління. Відповідно до нього дія  $v(t)$ , що управляє, виробляється в автоматичному пристрої як функція відхилення  $\varepsilon(t)$  регульованої величини  $y(t)$  від заданого значення  $g(t)$

$$v = \varphi(\varepsilon), \quad (5.2)$$

$$\varepsilon(t) = g(t) - y(t).$$



**Рис.5.2. Схема управління по відхиленню**

Використання інформації з виходу об'єкту управління для формування дії, що управляє, називається *зворотним зв'язком*. Оскільки знак розузгодження  $\epsilon(t)$  протилежний знаку  $g(t)$ , такий зворотний зв'язок називається *негативним*. На Рис.5.2 цей зв'язок показаний стрілкою, направленою з виходу ОУ на вхід АП, а кружком, розділеним на сектори, показаний суматор. Стрілки, що направлені до секторів, позначають складові сигнали, стрілка, що відходить від одного з секторів, – суму. Складові, що вводяться в суматор із зворотним знаком (від'ємні), позначаються знаком «-» у вершини стрілки.

Перевагою принципу зворотного зв'язку є його висока точність. Майже завжди можна відшукати таку функцію (5.2), яка забезпечить достатньо точний збіг вихідної величини із заданим значенням (аргументами  $\phi$  можуть бути також похідні або інтеграли  $\epsilon$  за часом).

В той же час управління по відхиленню має і серйозний принциповим недолік. Він виявляється в тому, що управління завжди “трохи запізнюється”. У системах, побудованих на цьому принципі, вихідна величина спочатку повинна відхилитися від завдання, а вже потім регулятор приведе її до необхідного значення.

### **5.3 Управління по збуренню (принцип компенсації)**

Для усунення вказаного недоліку запропонований принцип компенсації (Рис.5.3), при якому управляюча дія  $v(t)$  виробляється АП за інформацією

про відхилення  $\Delta f(t)$  поточного значення збурення  $f(t)$  від його базового значення  $f^*(t)$

$$v = (f), \quad (5.3)$$

$$\Delta f(t) = f^*(t) - f(t).$$

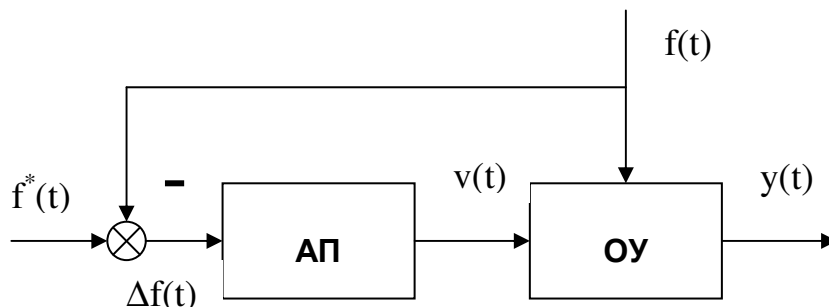


Рис.5.3. Схема управління по збуренню

Іншими словами, управління виробляється у функції збурення так, щоб дія останнього на систему компенсувалося («попереджуваче управління»).

Системи регулювання по збуренню зазвичай відрізняються від систем із зворотним зв'язком більшою стійкістю і швидкодією.

Недоліки ж принципу компенсації пов'язані з труднощами, які виникають при вимірюванні більшості збурень, і, як наслідок, з неможливістю їх обліку в повному об'ємі.

Важливо відзначити, що для реалізації управління по збуренню необхідно мати в своєму розпорядженні математичну модель об'єкту, тобто залежностями, що пов'язують вихідну величину зі збуреннями і з дією, що управляє, відсутність яких часто обмежує застосування даного принципу.

Для об'єднання переваг двох останніх принципів їх реалізують одночасно. У комбінованих системах є два канали регулювання: канал регулювання по відхиленню і канал регулювання по збуренню (Рис.5.5). У кожному каналі є свій регулятор. Природно, конструкція комбінованих систем складніша, а вартість вища.

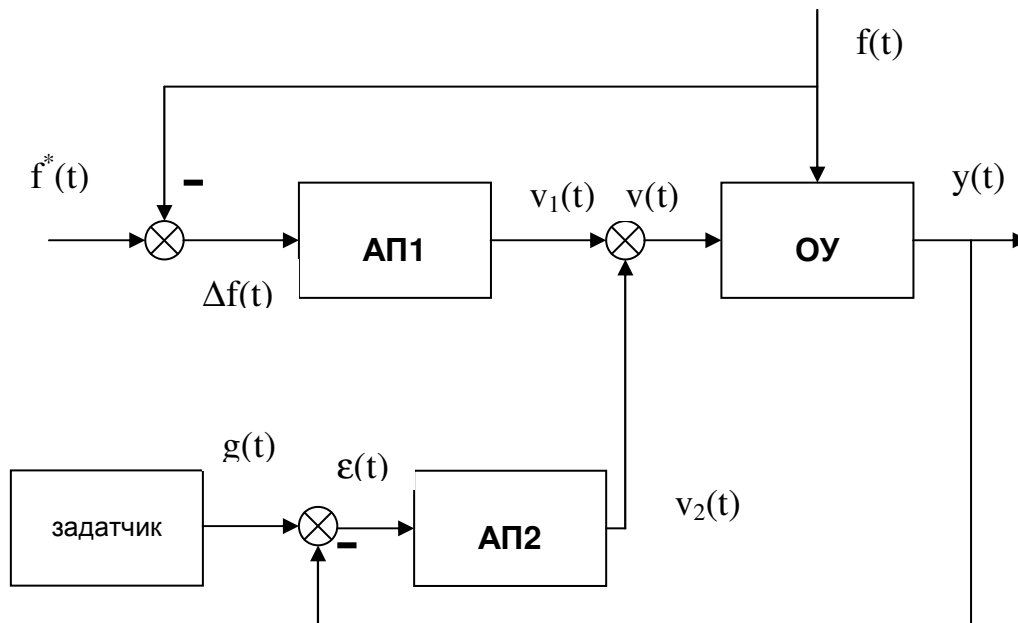


Рис.5.5. Комбінована система управління

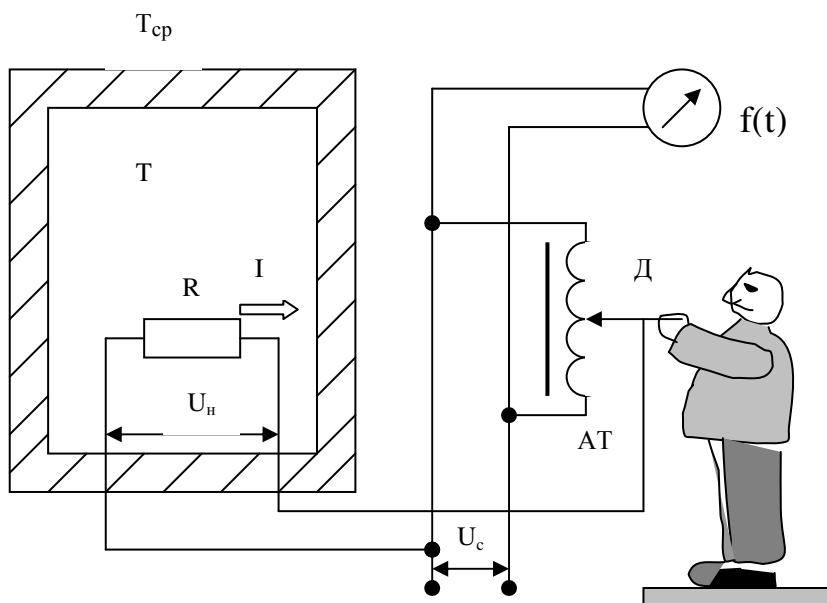
#### 5.4 Приклад реалізації принципів управління

Для більшої наочності розглянемо суть описаних принципів на прикладі управління температурою в печі з електронагрівачем (Рис.5.4). Припустимо, що піч має малі розміри і температура  $T$  у печі у будь-який момент однакова.

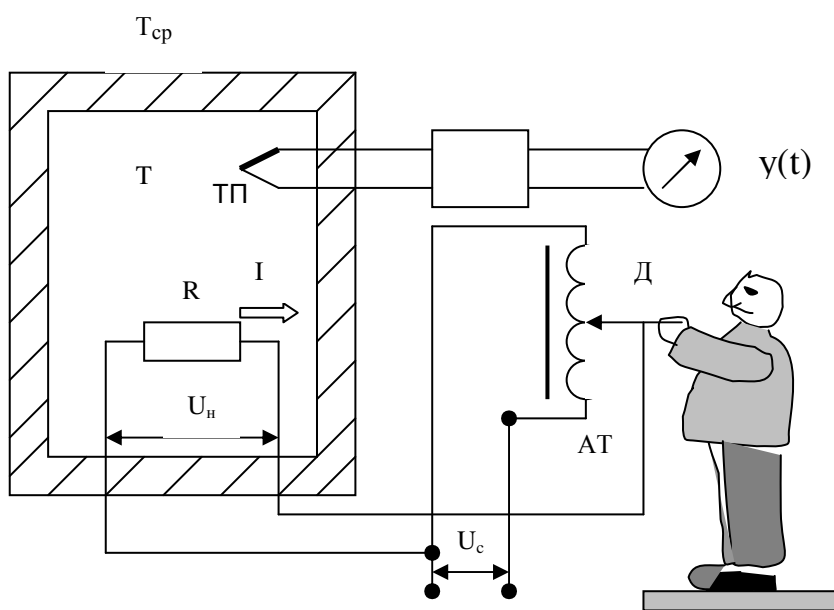
Керованою величиною є середня температура  $T$ , а величиною, що управляє, є сила струму  $J$  в електронагрівальному елементі. Збурюючими діями є коливання напруги в мережі  $U_c$  (основне збурення), зміни опору нагрівального елемента  $R$ , зміни теплоємності і теплопровідності печі, також зміни температури навколишнього середовища  $T_{cp}$ .

1) У розімкненій системі управління оператор задає значення сили струму  $J_{зад}$  відповідно до інструкції.

2) У компенсуючій системі управління (Рис.5.4, а) оператор не отримує інформації про температуру в печі  $T$ , але він знає, як зміниться величина  $T$  при певній зміні напруги в мережі  $U_c$ . Вимірюючи величину  $U_c$ , він пересуває повзун  $D$  автотрансформатора  $AT$  і встановлює



а)



б)

Рис.5.4. Система автоматичного управління температурою печі з електронагрівачем

необхідне значення напруги  $U_n$ , компенсуючи тим самим вплив збурюючої дії.

3) У системі із зворотним зв'язком (Рис.5.4, б) за допомогою термопари ТП і вторинного приладу вимірюється керована величина – температура в печі Т. Якщо величина Т менше необхідною  $T_{зад}$ , то оператор збільшує напругу  $U_n$ , і навпаки. Тут для формування дії, що управляє, використовується відхилення поточного значення величини Т від необхідного значення  $T_{зад}$ .

### 5.5 Оптимальне і адаптивне управління

Оптимальні САУ – це системи, в яких забезпечується оптимальне значення основного показника якості роботи системи, наприклад, тривалість перехідного процесу, точність відробітку дії, що управляє, або мінімізація споживаної потужності об'єкту управління. У ряді технологічних процесів показник якості, або ефективність, виражається в кожен момент часу функцією характеристик системи. Ця функція може бути представлена у вигляді багатовимірної поверхні у фазовому просторі параметрів. При цьому управління може вважатися за *оптимальний*, якщо воно забезпечує утримання показника якості в точці екстремуму.

Це значення під впливом різних збурень може зміщуватися в якомусь певному напрямі, але при цьому невідомо, в якому саме напрямі слід впливати на регулюючий орган, щоб повернути систему до екстремуму. Зазвичай для здійснення екстремального управління виконуються спочатку невеликі пробні рухи, потім аналізується реакція на них системи і, за наслідками аналізу, виробляється дія, що управляє.

На рисунку 5.6 приведена функціональна схема з пошуком оптимального управління. Блок вимірювання показника ефективності БВПЕ, що вимірює параметри процесу і що обчислює по ним показник якості  $J = f(y_1, y_n)$ , підключений до виходу об'єкту управління ОУ. Блок пробної дії БПВ генерує дії  $V_i$  на регулюючих

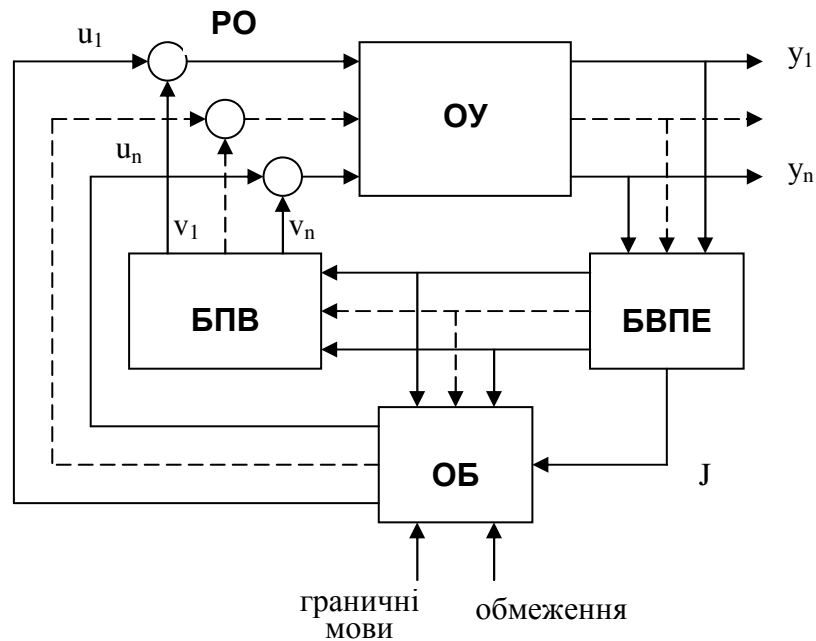


Рис.5.6. Схема оптимального управління з пошуком

органи РО. Обчислювальний блок ОБ, отримуючи інформацію як про граничні умови, різні обмеження на параметри і введені дії, так і про зміну під їх впливом  $J$ , виробляє необхідні дії  $u_i$ .

Для досягнення мети управління регулятор може не тільки виробляти дії, що управляють, на об'єкт, але і змінювати свої власні властивості: параметри, структуру, закон регулювання. При цьому змінюються властивості системи в цілому. Маються на увазі так звані контрольовані або передбачені зміни, а не такі, які відбуваються із-за випадкових помилок вимірювання, старіння елементів і тому подібне

*Звичайні системи* не змінюють своїх властивостей під час експлуатації. Їх властивості призначаються в процесі проектування, виходячи з деяких типових або найбільш вірогідних умов роботи і зберігаються незмінними при відхиленні реальних умов від передбачених при проектуванні. Отже, процес управління, що є оптимальним для передбачених умов, немає таким для непередбачених випадків. У такому разі перенастроювання системи повинна проводити людина.

*Системи, що пристосовуються або адаптивні*, володіють здатністю самостійно покращувати свої властивості в процесі експлуатації. Якщо система автоматично змінює свої параметри – її називають самоналагоджувальною, а якщо додатково вона змінює і свою структуру – маємо систему, що сама організується.



Сфера застосування адаптивних САУ – управління об'єктами, властивості і умови роботи яких недостатньо відомі або дуже динамічні.

### 5.6 Режими функціонування систем автоматизації

Залежно від того, як виробляється і передається на об'єкт управління дія, що управляє, можна виділити наступні режими функціонування:

- режим ручного управління;
- режим поради оператора;
- автоматичний режим.

Розглянемо сутність кожного з цих режимів на прикладі системи, що працює за принципом зворотного зв'язку.

При *ручному управлінні* (Рис.5.7, а) оператор Оп отримує від системи тільки інформацію про величину регульованого параметра. Її видає відповідний датчик Д. Аналіз цієї інформації, вироблення дії, що управляє, і передача її на виконавчий механізм ВМ покладені на оператора.

У режимі *поради оператора* (Рис.5.7, б) система, використовуючи включене в неї обчислювальний пристрій ОП сама обчислює дію, що управляє, і пропонує своє рішення операторові як підказку. Якщо оператор згоден з пропозицією системи, він видає його виконавчому механізму. Інакше він сам ухвалює рішення по управлінню, як при ручному режимі. Режим поради оператора застосовують зазвичай при недостатній вивченості об'єкту управління, коли є сумніви в здатності системи враховувати всі нюанси роботи ОП.

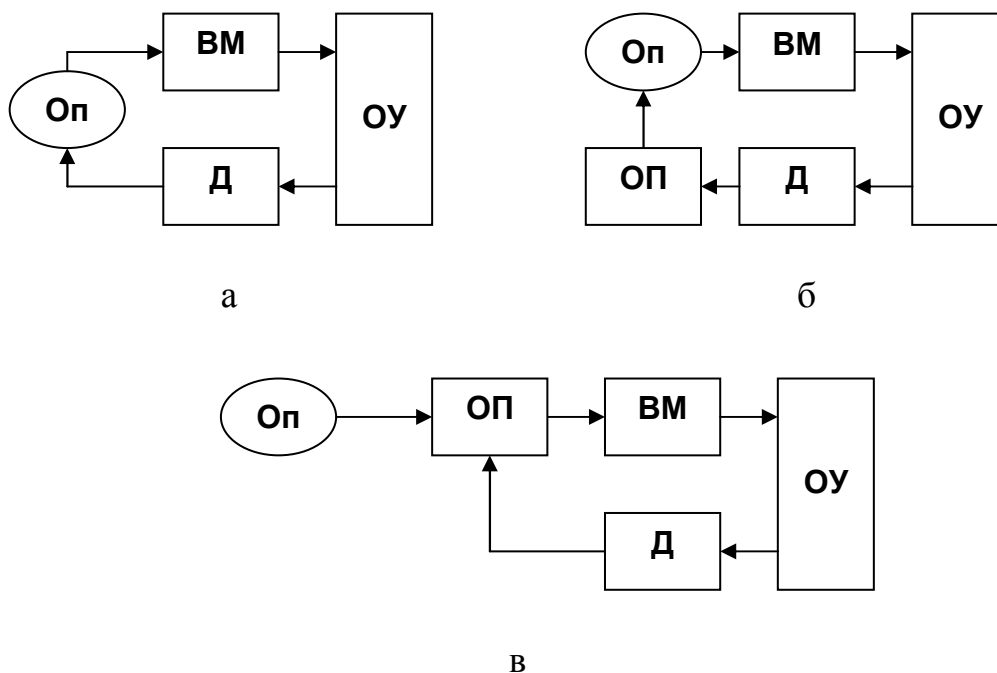


Рис.5.7. Схеми режимів функціонування систем автоматизації:  
 а – ручне управління; б – порадирика оператора;  
 у – автоматичний

Якнайповніше завдання автоматизації вирішується системою в *автоматичному режимі* (Рис.5.7, в). Тут оператор виведений з контура управління. У його функції входить тільки призначення задаючої дії і пасивне спостереження за системою.

## 6 ТИПОВІ ДИНАМІЧНІ ЛАНКИ

### 6.1 Властивості типових динамічних ланок

При аналізі і синтезі САР зручно представляти такими, що їх складаються з простих елементів, званих типовими динамічними ланками. Динамічні ланки підрозділяються тільки по динамічних властивостях (виду диференціального рівняння), які можуть бути однакові при різній фізичній суті процесу в ланці, тобто одним і тим же типом динамічної ланки охоплюються елементи, в яких протікають різні фізичні процеси (електричні, теплові, гідравлічні).

Складні елементи представляються у вигляді сукупності певним чином сполучених типових динамічних ланок.

До типових динамічних ланок пред'являють наступні вимоги:

1. Ланка має одну вхідну і одну вихідну величину.
2. Сигнал проходить в одному напрямі (детектуюча властивість ланки).
3. Динаміка ланки описується диференціальним рівнянням не вище 2-го порядку.

Властивості ланок вивчають по вигляду перехідного процесу при подачі на вхід одиничного ступінчастого збурення  $x(t) = 1$ , тобто по *перехідній характеристиці*.

При такому підході для аналізу якості систем регулювання необхідно по диференціальних рівняннях елементів системи скласти її диференціальне рівняння. Для полегшення дослідження властивостей динамічних ланок вводиться поняття передаточної функції.

## 6.2 Поняття передаточної функції

Для аналізу роботи системи управління потрібно скласти диференціальне рівняння, що описує її динаміку. Потім отримати загальне вирішення цього рівняння, побудувати перехідною процес і проаналізувати його з погляду якості роботи системи. Для полегшення рішення цієї задачі використовується поняття *передаточної функції*.

Запишемо диференціальне рівняння системи управління в загальному вигляді

$$\sum_{i=0}^n A_i \frac{d^i y}{dt^i} = \sum_{j=0}^m B_j \frac{d^j x}{dt^j} . \quad (6.1)$$

Тут похідною нульового порядку є сама змінна.

Спростимо цей вираз, використовуючи оператора Лапласа .

Для цього введемо позначення операцій:

диференціювання  $\frac{d}{dt} = p$ ; інтегрування  $\int dt = \frac{1}{p}$ .

Перетворимо рівняння (6.1) по Лапласу

$$\sum_{i=0}^n A_i p^i y = \sum_{j=0}^m B_j p^j x, \quad (6.2)$$

яке можна представити у вигляді

$$A_n(p) \cdot y = B_m(p) \cdot x. \quad (6.3)$$

*Передаточна функція*  $W(p)$  – це відношення операторного полінома  $B_m(p)$  що характеризує вхідну величину  $x$  до операторного полінома  $A_n(p)$  що характеризує вихідну величину  $y$ .

Отже, передаточна функція –

$$W(p) = \frac{B_m(p)}{A_n(p)} = \frac{x}{y}. \quad (6.4)$$

### 6.3 Динамічні ланки першого порядку

Типові динамічні ланки першого порядку підрозділяються на статичні, астатичні, диференціюючі і ланка чистого запізнення.

До *статичних* відносяться такі ланки, які при ступінчастій вхідній дії переходять з початкового положення рівноваги в нове.

#### 6.3.1 Пропорційна ланка

Цю ланку називають також підсилювальною і безінерційною. Ланка описується рівнянням алгебри

$$y = k \cdot x$$

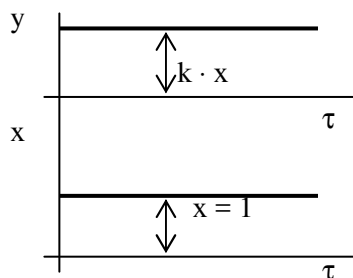
де  $k$  – коефіцієнт передачі (посилення), що має розмірність одиниці вихідної величини  $y$ , ділену на одиницю вхідної величини  $x$

$$k = \frac{\text{од. вимір. } y}{\text{од. вимір. } x}.$$

Передаточна функція пропорційної ланки дорівнює його коефіцієнту передачі –  $W(p) = k$ .

Перехідна характеристика виглядає таким чином

Рис.6.1. Перехідна характеристика пропорційної ланки



Підсилювальна ланка не трансформує форму вхідного сигналу, а змінює тільки його масштаб в до раз.

Прикладами пропорційних ланок можуть служити (Рис.6.2):

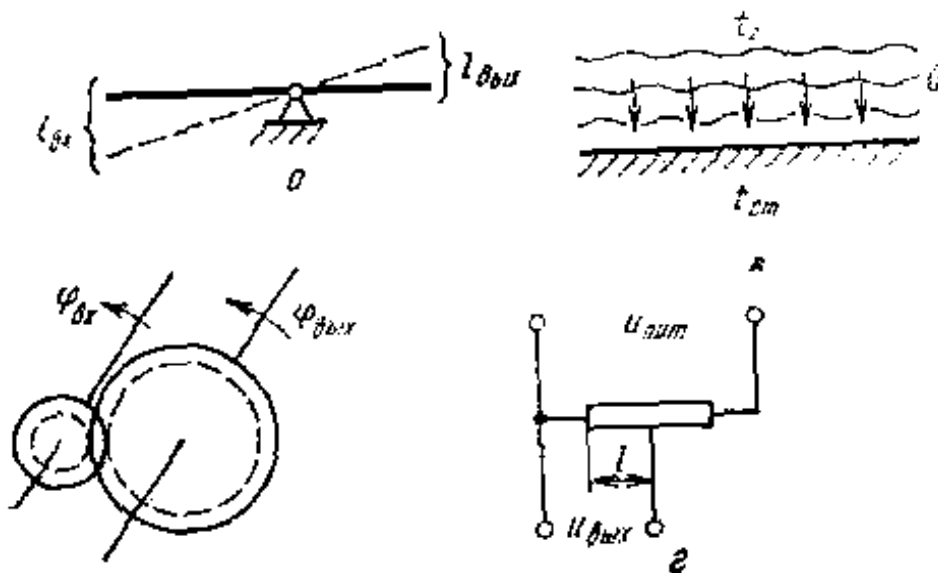


Рис.6.2. Приклади пропорційних ланок

а) важіль, якщо вхідна величина  $x$  – зусилля на одному кінці важеля, а вихідна величина  $y$  – зусилля на іншому його кінці (Рис.6.2,а);

б) зубчата передача, якщо  $x = (\text{вх} - \text{кут повороту малої шестерні})$ , а  $y = (\text{вих} - \text{кут повороту великої шестерні})$  (Рис.6.2,б);

в) тепловіддача конвекцією від рухомого газу до стінки, якщо  $x = \text{разність температур газу і стінки } \Delta t = t_{\Gamma} - t_{\text{СТ}}$ , а  $y = \text{кількість тепла } Q$ , що віддається (Рис.6.2,в);

г) датчик потенціометра вимірювального приладу, якщо  $x = \text{переміщення движка } l$ , а  $y = \text{напряга } U_{\text{вих}}$ , що знімається з датчика (Рис.6.2,г).

### 6.3.2 Аперіодична (інерційне) ланка першого порядку

Динаміка цієї ланки описується диференціальним рівнянням

$$T \frac{dy}{dt} + y = kx,$$

де  $k$  – коефіцієнт передачі;  $T$  – постійна часу, с.

Передаточна функція ланки

$$W(p) = k / (Tp + 1).$$

Перехідна характеристика ланки  $h(t) = k(1 - e^{-t/T})$ . Таким чином, ланка накопичує енергію або речовину і, завдяки цьому,  $Y$  набуває свого значення через час

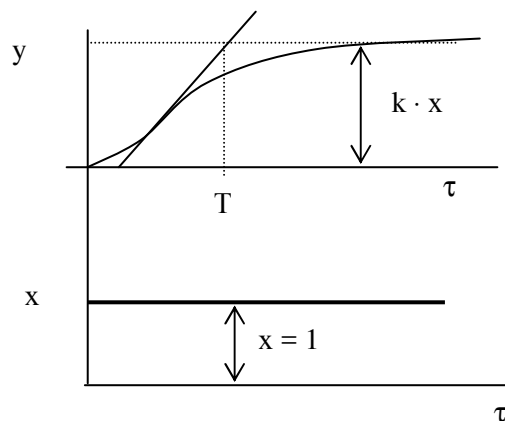


Рис.6.3. Перехідна характеристика інерційної ланки

На графіку перехідної функції (Рис.6.3) відрізок, що відсікається дотичною, проведеною в початковій точці, при сталому значенні вихідної величини рівний постійною часу  $T$ .

Отже, *постійна часу* – це час, за який вихідна величина досягла б свого сталого значення, якби змінювалася з постійною початковою швидкістю. Чим більше  $T$ , тим довільніше перехідний процес. Практично перехідний процес вважається за той, що закінчився через час  $\tau \approx 3 T$ .

Прикладами аперіодичних ланок можуть служити:

а) електропривод постійного струму, якщо вхідна величина  $x$  – напруга, що підводиться,  $i$ , а вихідна величина  $y$  – швидкість обертання  $n$ ;

б) проміжний ківш МБЛЗ, якщо  $x = G_{\text{пр}} - G_{\text{вит}}$  – баланс надходження і витрати рідкого металу, а  $y$  – рівень металу  $H$ ;

в) нагрів тіла, поміщеного в середовище з температурою  $t_c$  (тепловіддача оцінюється за законом Ньютона  $q = \alpha(t_c - t_m)$ , де  $q$  – щільність теплового потоку на тіло, що нагрівається;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі), якщо  $t_c$  – вхідна величина, а середня температура тіла  $t_m$  – вихідна величина;

г) електричний RC-ланцюг, якщо  $U_{\text{вх}} = x$ , а  $U_{\text{вих}} = y$ .

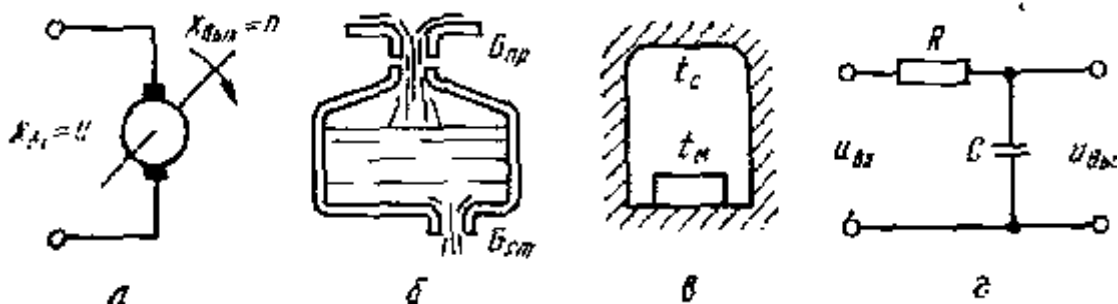


Рис.6.4. Приклади інерційних ланок

*Астатичні (інтегруючі) ланки* – це такі ланки, у яких після надходження на вхід ступінчастої дії вихідна величина не приходить до сталого значення (як у статичних), а безперервно змінюється.

### 6.3.3 Ідеальна інтегруюча ланка

У такій ланці вихідний сигнал пропорційний інтегралу від вхідної величини. Це властивість ланки описується виразом

$$x_{вих} = k_1 \int_0^{\tau} x_{вх} d\tau \quad \text{або}$$

$$\frac{d x_{вих}}{d\tau} = k_1 x_{вх}$$

Перетворимо останній вираз по Лапласу –  $p \cdot y = k_1 \cdot x$ . Тоді передаточна функція ланки має вигляд –  $W(p) = k_1 / p$ .

Перехідна характеристика ланки  $h(t) = k_1 \cdot t$  є прямою лінією з кутом нахилу  $\alpha = \text{arctg } k_1$  (Рис.6.5).

Приклади інтегруючих ланок:

а) електродвигун, якщо вхідна величина – напруга живлення  $U$ , а вихідна величина – кут повороту якоря  $\varphi$ ,

б) ванна рідкого металу в сталеплавильній печі, якщо вхідна величина – тепловий потік через поверхню ванни  $q$ , а вихідна величина – зміна середньої температури металу  $\Delta t_m$ .

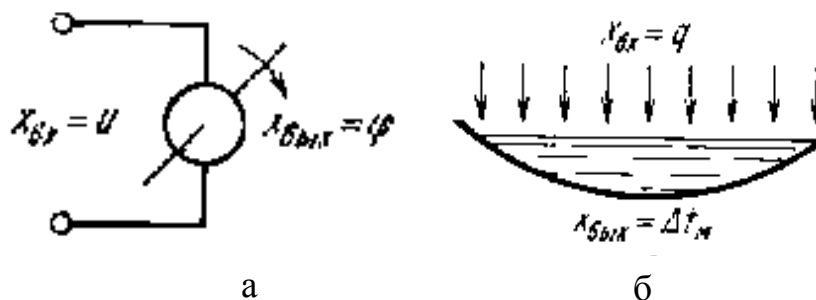


Рис.6.5. Приклади інтегруючих ланок

**6.3.4 Реальна інтегруюча ланка** (інтегруюча ланка з уповільненням) описується диференціальним рівнянням

$$T \frac{d^2 y}{dt^2} + y = k_1 x.$$

Передаточна функція ланки

$$W(p) = k_1 / p (Tp + 1).$$



Перехідна характеристика реальної інтегруючої ланки  $h(\tau) = (\tau - T(1 - e^{-\tau/T}))$  відрізняється від перехідної функції ідеальної ланки в початковий момент часу, а потім переходить в паралельну нею пряму лінію з тим же кутом нахилу  $\alpha = \arctg k_1$  (Рис.6.6).

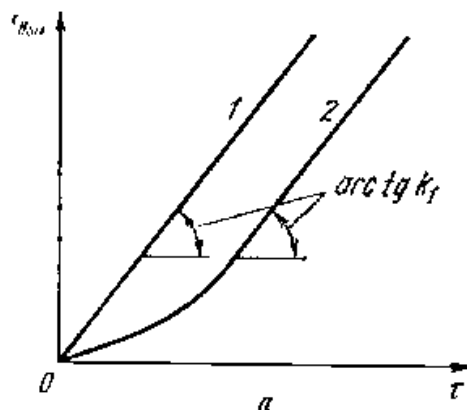


Рис.6.6. Порівняльні перехідні характеристики ідеальної (1) і реальної (2) інтегруючих ланок

Прикладами реальних інтегруючих ланок можуть служити ті ж об'єкти (див. Рис.6.5), якщо точніше розглядати їх рівняння руху. Наприклад, електродвигун з постійною швидкістю обертання буде ідеальною інтегруючою ланкою. Проте у момент пуску постійна швидкість валу встановиться не відразу, а з деяким уповільненням і, тому, електродвигун слід розглядати як реальна інтегруюча ланка.

### 6.3.5 Ідеальна диференціююча ланка

Диференціальне рівняння ланки

$$y = T_D \frac{dx}{dt},$$

де  $T_D$  – час диференціювання ланки, що має розмірність одиниці вихідної величини, що ділиться на одиницю швидкості зміни вхідної величини.

Передаточная функція ланки

$$W(p) = T_D p.$$

Перехідна характеристика ланки

$$h(t) = T_D \cdot \delta(t)$$

Тут  $\delta(t)$  – так звана дельта-функція – миттєвий імпульс нескінченно великої амплітуди.. Поєтому перехідна характеристика ідеальної ланки є кидком вихідної величини в нескінченність у момент нанесення ступінчастої вхідної дії.

Найближче до ідеальної ланки наближається тахогенератор постійного струму, якщо вхідний величиною рахувати кут повороту якоря, а вихідний – э.д.с. якорі (Рис.6.7).

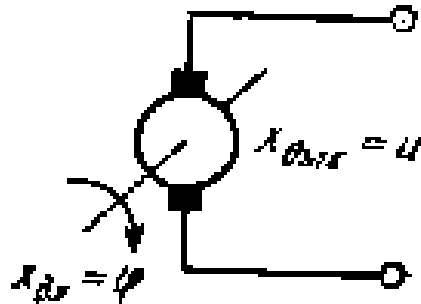


Рис.6.7. Приклад диференціюючої ланки

**6.3.6 Реальна диференціююча ланка** (диференціююча ланка з уповільненням) описується диференціальним рівнянням

$$T \frac{dy}{d\tau} + y = T_D \frac{dx}{d\tau}.$$

Передаточна функція ланки  $W(p) = T_D p / (Tp + 1)$ .

Перехідна характеристика ланки  $h(t) = ( \partial_0 / T ) e^{-t/T}$  є експонентою, дотична до якої в початковій точці відсікає на нульовому значенні вихідної величини постійну часу  $T$ .

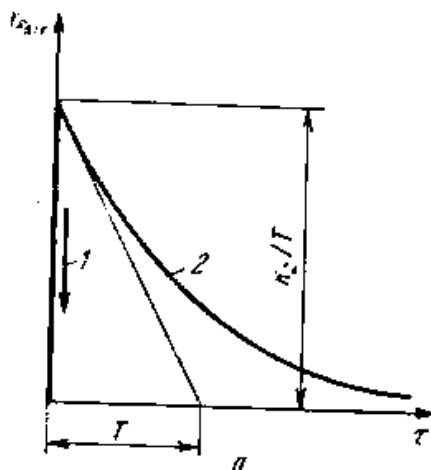


Рис.6.8. Перехідні функції ідеального (1) і реального (2) диференціюючого ланок

### 6.3.7 Ланка чистого запізнювання

На відміну від інших ланок, ця ланка описується рівнянням з аргументом, що запізнюється

$$y(t) = x(t - \tau),$$

де  $t$  - поточний час;  $\tau$  - час чистого запізнювання.

Форма сигналу при цьому не міняється, він просто зміщується в часі.

Передаточна функція цієї ланки має вигляд  $W(p) = \text{до} \cdot \exp(-p \cdot \tau)$ , а перехідна функція  $h(t) = \text{до} \cdot (t - \tau)$ .

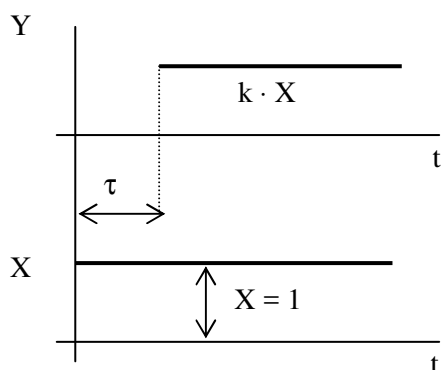


Рис.6.9. Перехідна характеристика ланки чистого запізнювання

Характерним прикладом ланки чистого запізнювання служить транспортер (наприклад, стрічка агломераційної машини), на якому після зміни вхідної величини (товщина шару сипкого матеріалу) повинно пройти час  $\tau_0 = l/v$  ( $l$  – довжина транспортера;  $v$  – його швидкість;  $\tau_0$  – час чистого транспортного запізнювання), після якого таким же чином зміниться вихідна величина.

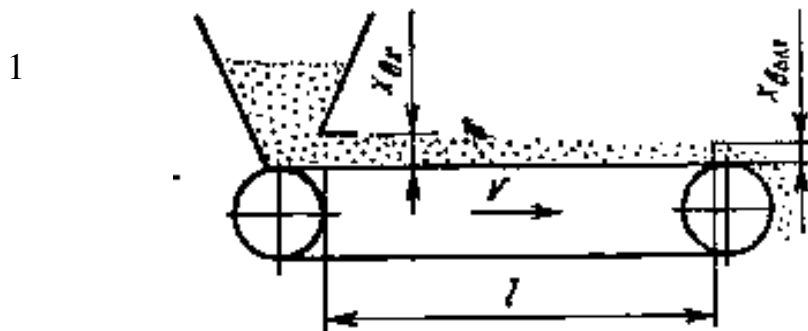


Рис.6.10. Приклад ланки чистого запізнювання

#### 6.4 Класифікація динамічних ланок другого порядку

Диференціальні рівняння таких ланок мають загальний вигляд

$$T_2^2 \frac{dy}{dt} + T_1 \frac{dy}{dt} + y = K x,$$

а передаточна функція –  $W(p) = K / (T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)$ .

Залежно від співвідношення постійних часу  $T_1$  і  $T_2$  :

а) Якщо, то ланка називається аперіодичною другого порядку.

Перехідною процес є S-образною кривою з перегином в крапці Про (Рис.6.10).

Приклади аперіодичної ланки другого порядку (Рис.6.11):

а) послідовне з'єднання двох пневматичних ємкостей, якщо вхідна величина  $x = P_{in}$ , а вихідна величина – тиск в другій ємкості  $y = P$  ;

б) подвійний електричний RC-ланцюг.

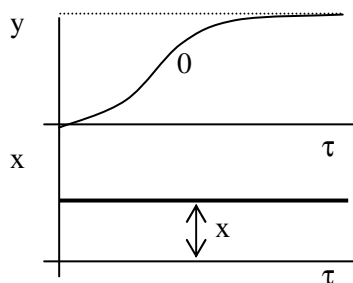


Рис.6.10. Перехідна характеристика аперіодичної ланки другого порядку

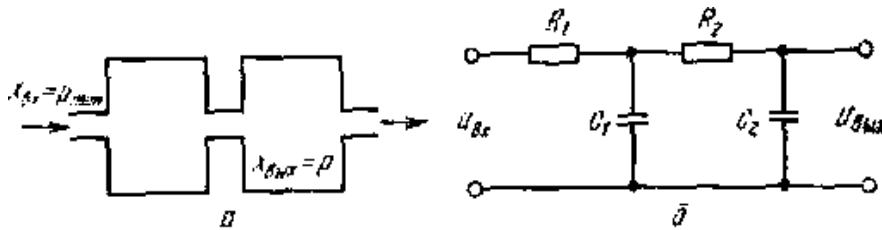


Рис.6.11. Приклади аперіодичних ланок другого порядку

б) Якщо, то ланка називається таким, що коливає.

Диференціальне рівняння ланки зазвичай представляється у вигляді

$$T^2 \frac{dy}{dt} + 2T \xi \frac{dy}{dt} + y = kx ,$$

де  $\xi$  – коефіцієнт загасання,  $0 < \xi < 1$ . При цьому коріння характеристичного рівняння комплексне.

Перехідна характеристика ланки є періодичним процесом (Рис.6.12), що сходиться, описується формулою

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

де  $\alpha = \xi/T$   $\omega = \sqrt{1 - \xi^2} / T$ .

Прикладами коливальних ланок можуть служити (Рис.6.13):

а) електричний коливальний *RCL-контур* (R – активний опір, C – ємність, L – індуктивність);

б) пружна механічна передача, яка складається з вхідного 1 і вихідного 2 валів, пружного елемента 3, маховика 4 і демпфера 5, що чинить опір обертанню валу. Вхідна величина  $x$  – кут повороту вхідного валу  $\varphi_1$ , вихідна величина  $y$  – кут повороту вихідного валу  $\varphi_2$ .

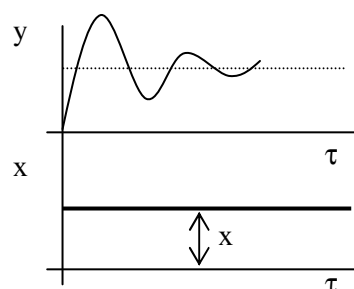


Рис.6.12. Перехідна характеристика коливальної ланки

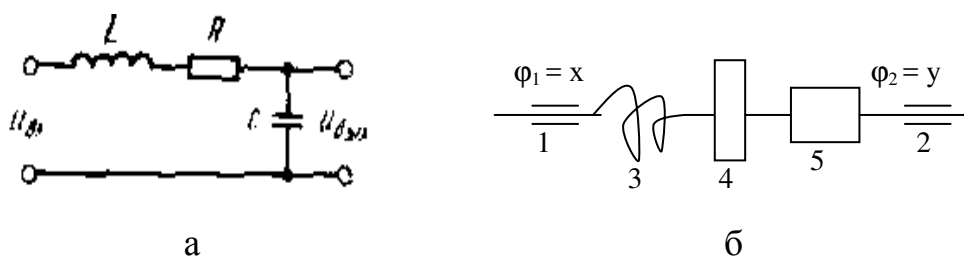


Рис.6.13. Приклади коливальних ланок

в) Якщо  $T_1 = 0$ , тобто немає демпфування, маємо консервативну ланку –

$$T_2^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + y = \kappa x.$$

Перехідна характеристика є гармонійними незгасаючими коливаннями (у природі такої ланки немає).

г) Якщо  $T_1 < 0$  – це нестійка коливальна ланка з коливаннями, що розходяться.

До динамічних ланок другого порядку відносяться також розглянуті вище реальні інтегруюча і диференціююча ланки.

Класифікацію динамічних ланок другого порядку можна графічно зобразити таким чином (Рис.6.14).

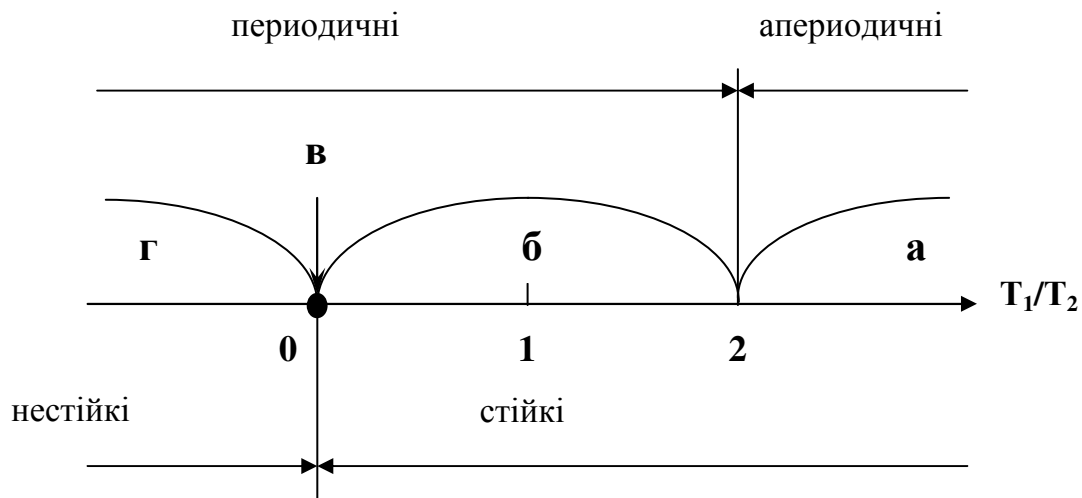


Рис.6.14. Класифікація динамічних ланок другого порядку

## 6.5 Передаточні функції з'єднань динамічних ланок

**6.5.1 Послідовне з'єднання** – з'єднання, у якого вихідна величина попередньої ланки є вхідною величиною подальшої ланки

$$x = x_1; \quad y_1 = x_2; \quad y_2 = x_3; \quad y_3 = y.$$

Виведення рівняння динаміки послідовного з'єднання ланок:

$$y_1 = W_1(p) \cdot x_1; \quad y_2 = W_2(p) \cdot x_2; \quad y_3 = W_3(p) \cdot x_3.$$

$$y = y_3 = W_3(p) \cdot x_3 = W_3(p) \cdot y_2 = W_3(p) \cdot W_2(p) \cdot x_2 = W_3(p) \cdot W_2(p) \cdot y_1 =$$

$$= W_3(p) \cdot W_2(p) \cdot W_1(p) \cdot x_1 = W_3(p) \cdot W_2(p) \cdot W_1(p) \cdot x$$

$$W(p) = \frac{x_{\text{вих}}}{x_{\text{вх}}} = \frac{W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) \cdot x_{\text{вх}}}{x_{\text{вх}}} = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p).$$

Таким чином, передаточна функція послідовного з'єднання ланок дорівнює твору передавальних функцій окремих ланок.

**6.5.2 Паралельне з'єднання** – з'єднання, у якого вхідні величини всіх ланок рівні, а вихідна дорівнює сумі вихідних величин окремих ланок

$$x = x_1 = x_2 = x_3; \quad y = y_1 + y_2 + y_3.$$

Виведення рівняння динаміки паралельного з'єднання ланок:

$$y_1 = W_1(p) \cdot x_1; \quad y_2 = W_2(p) \cdot x_2; \quad y_3 = W_3(p) \cdot x_3.$$

$$y = y_1 + y_2 + y_3 = W_1(p) \cdot x_1 + W_2(p) \cdot x_2 + W_3(p) \cdot x_3 =$$

$$= W_1(p) \cdot x + W_2(p) \cdot x + W_3(p) \cdot x = x[W_1(p) + W_2(p) + W_3(p)].$$

$$W(p) = \frac{x_{\text{вих}}}{x_{\text{вх}}} = W_1(p) + W_2(p) + W_3(p).$$

Передаточна функція паралельного з'єднання ланок дорівнює сумі передавальних функцій окремих ланок.

### 6.5.3 Зустрічно-паралельне з'єднання ланок

Подача сигналу з виходу ланки на його вхід називається зворотним зв'язком. На Рис.6.15 ланка 1 охоплена зворотним зв'язком за допомогою ланки 2. Ланка 2 називають ланкою зворотного зв'язку.

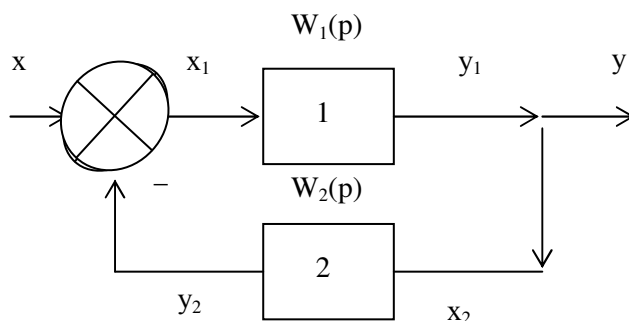


Рис.6.15. Зустрічно –паралельне з'єднання ланок

Розрізняють позитивний і негативний зворотні зв'язки. Якщо сигнал зворотного зв'язку збільшує вхідний сигнал, то зв'язок позитивний, інакше – негативний.

Якщо як ланка зворотного зв'язку використовується підсилювальна ланка, то зв'язок називається жорстким. Якщо диференціальна ланка – маємо гнучкий зворотний зв'язок.



Розглянемо два важливі практичні випадки. Ланка 1 – об'єкт регулювання, ланка 2 – регулятор. Ланки 1 і 2 разом утворюють замкнуту систему регулювання. Розрізняють передаточні функції такої системи по навантаженню і за завданням.

**6.5.4 Передаточна функція по навантаженню**  $W_H(p)$  говорить про те, що збурення в системі прикладене до об'єкту регулювання (див. Рис.6.14). Для цієї системи можна записати наступні співвідношення сигналів:

$$x = x_1 = x_2 \quad ; \quad x_1 = x - y_2$$

$$y_1 = W_1(p) \cdot x_1; \quad y_2 = W_2(p) \cdot y.$$

$$\begin{aligned} y = y_1 &= W_1(p) \cdot x_1 = W_1(p) \cdot (x - y_2) = W_1(p) \cdot [x - W_2(p) \cdot y] = \\ &= W_1(p) \cdot [x - W_2(p) \cdot y] = W_1(p) \cdot x - W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot y. \end{aligned}$$

$$\text{Звідси} \quad - y \cdot [1 + W_1(p) \cdot W_2(p)] = W_1(p) \cdot x.$$

Таким чином, передаточна функція по навантаженню має вигляд

$$W_H(p) = \frac{W_1(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_2(p)}.$$

**6.5.5 Передаточна функція за завданням**  $W_3(p)$  означає, що збурення в системі прикладене до регулятора (Рис.6.16). Для такої системи управління можна записати наступні співвідношення сигналів:

$$y = y_1; \quad x = y_2; \quad x_1 = y_0 - y_1.$$

$$y_1 = W_1(p) \cdot x_1; \quad y_2 = W_2(p) \cdot x_2; \quad W_3(p) = y / y_0.$$

$$\begin{aligned} y = y_1 &= W_1(p) \cdot x_1 = W_1(p) \cdot y_2 = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot x_2 = \\ &= W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot (y_0 - y) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot y_0 - W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot y. \end{aligned}$$

$$\text{Звідси} \quad - y \cdot [1 + W_1(p) \cdot W_2(p)] = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot y_0.$$

Таким чином, передаточна функція за завданням має вигляд

$$W_3(p) = \frac{W_1(p) \cdot W_2(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_2(p)}$$

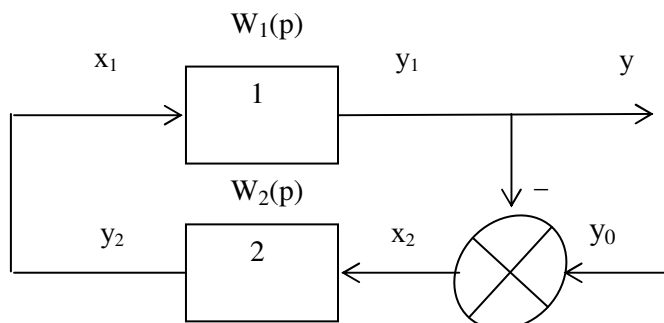


Рис.6.16. Зустрічно – паралельне з'єднання ланок з передаточною функцією по навантаженню

## 7 ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

Характер процесу переходу системи або її ланки з одного стану в інше визначається рівнянням руху ланки. Це рівняння (у загальному випадку, диференціальне), визначає зміна в часі вихідної величини ланки по заданій зміні в часі його вхідної величини.

У лінійній АСР, а також в її елементах зв'язок між вхідною і вихідною величинами описується диференціальними рівняннями вигляду

$$\sum_{i=0}^n a_i \frac{d^i y}{dt^i} = \sum_{j=0}^m b_j \frac{d^j x}{dt^j} \quad (7.1)$$

Вирішення дифуравнення (7.1) знаходиться як сума двох складових – вільної та вимушеної:  $y(t) = y_C(t) + y_B(t)$ .

Вільна складова  $y_C(t)$  є загальним вирішенням однорідного диференціального рівняння

$$a_n y^{(n)} + a_{n-1} y^{(n-1)} + \dots + a_1 y^{(1)} + a_0 y = 0$$

і визначається як

$$y_C(t) = \sum_{k=1}^n C_k e^{Z_k t}, \quad \text{до } = 1 \dots n$$

де  $C_k$  — постійні інтегрування  $Z_k$  — коріння характеристичного рівняння

$$a_n Z^n + a_{n-1} Z^{n-1} + \dots + a_1 Z + a_0 = 0. \quad (7.2)$$

Вимушена складова  $y_B(t)$  є частинним вирішенням диференціального рівняння (7.1) і визначається видом функції вхідної величини.

Властивості систем управління описуються їх реакціями на типові дії.

*Часові характеристики:* перехідна функція, яка дає реакцію системи на одиничний стрибкоподібний сигнал, і імпульсна (вагова) функція, яка описує реакцію системи на одиничну імпульсну дію.

## 7.1 Амплітудна і фазова частотні характеристики

*Частотні характеристики* описують вимушені рухи системи, що викликані гармонійною дією на вході  $x(t) = A_x \sin \omega t$  де  $A_x$  — амплітуда;  $\omega = 2\pi/T_k$  — кутова частота вхідних коливань з періодом  $T_k$ . Якщо  $A_x = 1$  то вхідна дія — *одинична гармонійна*.

Після закінчення перехідного процесу на виході лінійної системи встановлюються гармонійні коливання  $y(t) = A_y \sin(\omega t + \varphi)$  тієї ж частоти  $\omega$ , але з іншою амплітудою  $A_y$  і зрушені по фазі щодо вхідних коливань на кут  $\varphi(\omega)$ .

Зміни амплітуди  $A_y$  і фазове зрушення  $\varphi(\omega)$  є функціями частоти  $\omega$  і виражають динамічні властивості системи. Якщо змінювати частоту вхідних коливань від 0 до  $\infty$  і визначати сталу амплітуду і фазу вихідних коливань для різних частот, можна отримати залежність співвідношення амплітуд  $A(\omega) = A_y(\omega)/A_x(\omega)$  від частоти — *амплітудно-частотну (АЧХ)* і зрушення фази  $\varphi(\omega)$  — *фазово-частотну (ФЧХ)*.

Проведення такого дослідження можна представити, наприклад, так (рис.7.1): у трубопроводі подачі палива вмонтована дросельна заслінка, яку можна відкривати і закривати з певною частотою за допомогою спеціального механізму. При цьому можна забезпечити синусоїдальну зміну витрати палива, що є вхідний величиною  $x(t)$ . Якщо вимірювати температуру в печі – вихідний сигнал  $y(t)$  то побачимо, що в сталому режимі вона змінюватиметься з тією ж частотою, а максимумами і мінімумами витрати і температури будуть зрушені по фазі (рис.7.2).

Для кожної частоти вхідного сигналу (витрати газу) однієї і тієї ж амплітуди будуть **отримані** певні амплітуда і фазове **зрушення** вихідного сигналу (температури в печі).

Якщо **зобразити** залежність **відношення** амплітуд від частоти, **отримаємо** амплітудно-частотну характеристику (рис.7.3). **Відмітимо**, що у **звичайних** інерційних ланок АЧХ у міру збільшення частоти падає.

Хоча АЧХ теоретично продовжується до безкінечності, практичне значення має *смуга пропускання*, тобто діапазон частот, в якому амплітуда коливань вихідного сигналу складає не менше 5 % амплітуди коливань максимуму вихідного сигналу. Якщо у АЧХ ланки є максимум при  $\omega \neq 0$  то відповідну частоту називають *резонансною*.

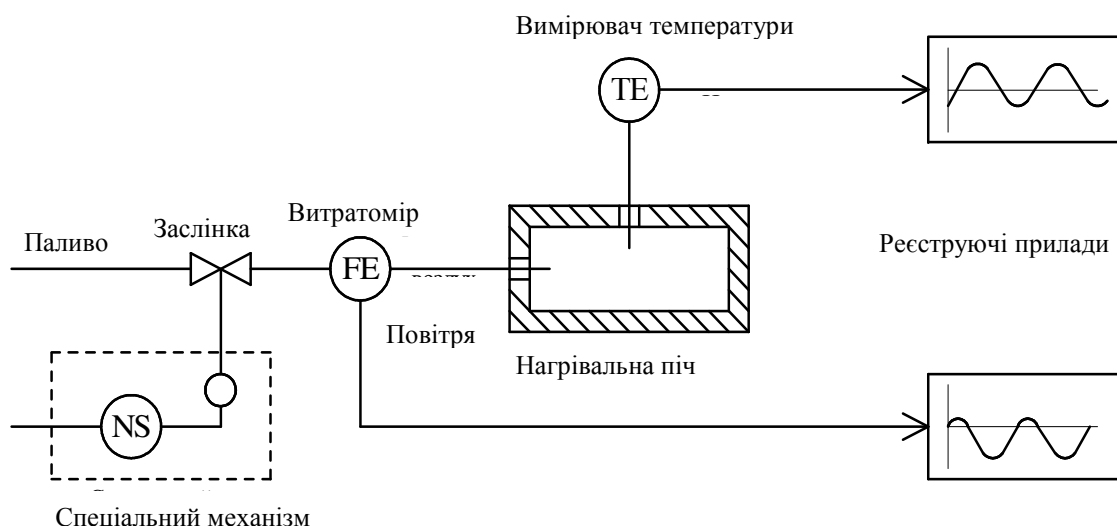


Рис.7.1. Схема експериментального визначення частотних характеристик

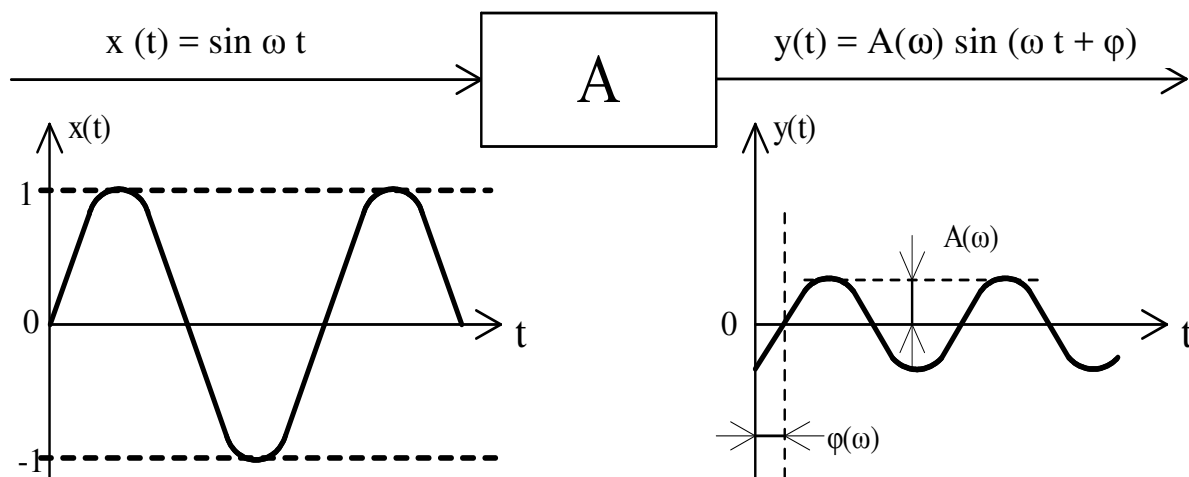


Рис.7.2. Вхідний і вихідний сигнали у сталому режимі

Зобразивши на графіці залежність фазового зрушення від частоти (рис.7.4), отримаємо фазово–частотну характеристику. ФЧХ у звичайних інерційних ланок негативна, тобто вихідні коливання відстають по фазі від вхідних, причому це відставання збільшується до напівперіоду із зростанням частоти  $\omega$  до безкінечності.

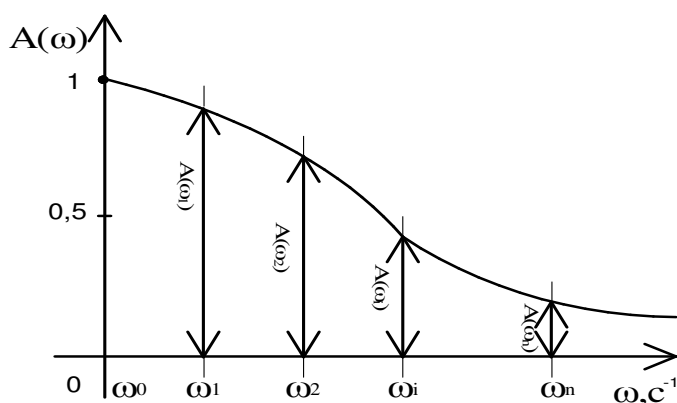


Рис.7.3. Побудова амплітудно-частотної характеристики (АЧХ)

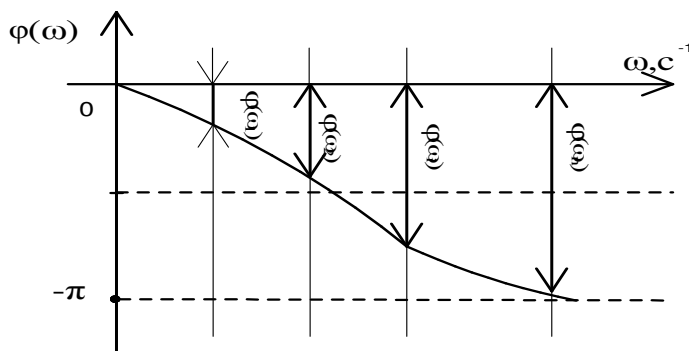


Рис.7.4. Побудова фазової частотної характеристики (ФЧХ)

## 7.2 Суміщена частотна характеристика

Звичайні АЧХ і ФЧХ можна об'єднати в одну характеристику, використовуючи  $A(\omega)$  і  $\varphi(\omega)$  як полярні координати.

На рис.7.5 показана побудова суміщеної амплитудно-фазової характеристики (АФХ). При цьому на промені, що виходить з початку координат під кутом  $\varphi(\omega_i)$ , відкладається  $A(\omega_i)$ . На такій характеристиці частота в явному вигляді відсутня. Проте кожній крапці на кривій відповідає певна частота.

Амплитудно-фазовою характеристикою (АФХ) називають *годограф*, який описує кінець вектора  $A(\omega)$  при зміні частоти  $\omega$  від 0 до  $\infty$ . Таким чином  $AФХ = АЧХ + ФЧХ$ .

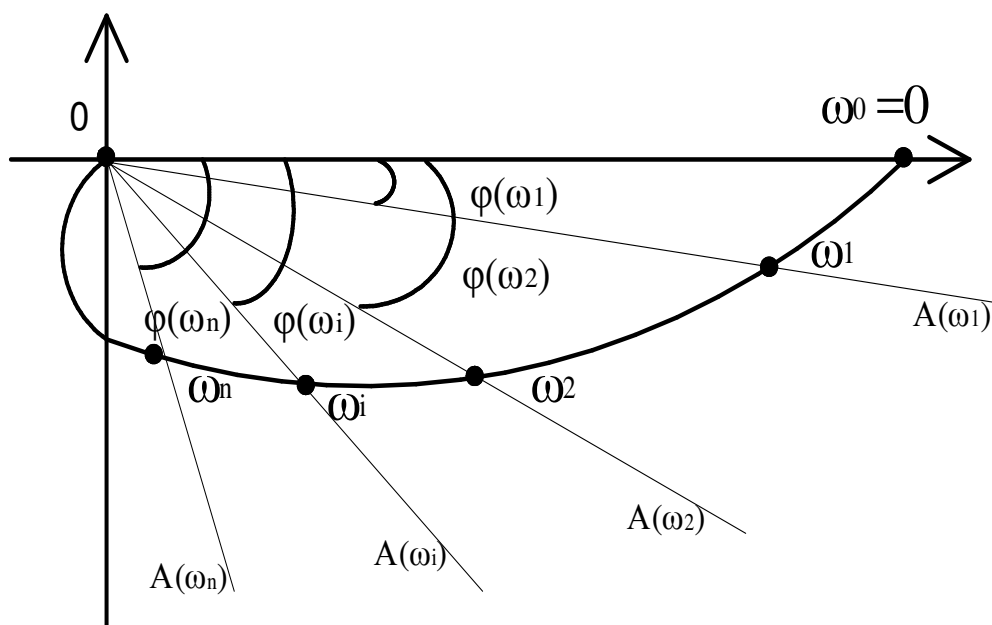


Рис.7.5. Побудова АФХ

## 7.3 Частотна передаточна функція

Якщо в передаточну функцію  $W(p)$  замість оператора Лапласа  $p$  підставити уявну змінну Фур'є  $j\omega$  отримаємо частотну передаточну

функцію  $W(j\omega)$  яку називають просто *частотною функцією*. Її можна представити у вигляді дійсної  $U(\omega)$  і уявної  $jV(\omega)$  частин (компонент)

$$W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega) \quad (7.3)$$

або в комплексній формі

$$W(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \quad (7.4)$$

де  $A(\omega)$  – модуль частотної функції, а  $\varphi(\omega)$  – її фаза.

Покажемо зв'язок між компонентами частотної функції і амплитудно-фазовою характеристикою (АФХ). Для цього на комплексній площині (рис.7.6) відкладемо дійсну  $U(\omega)$  і уявну  $V(\omega)$  частини. Якщо отриману крапку А з'єднати з початком координат, отримаємо вектор  $\overline{OA}$ , довжина (модуль) якого дорівнює  $A(\omega)$  а аргумент (кут, утворений цим вектором з дійсною позитивною піввіссю)  $\varphi(\omega)$ .

Таким чином

$$A(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}, \quad \varphi(\omega) = \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)}. \quad (7.5)$$

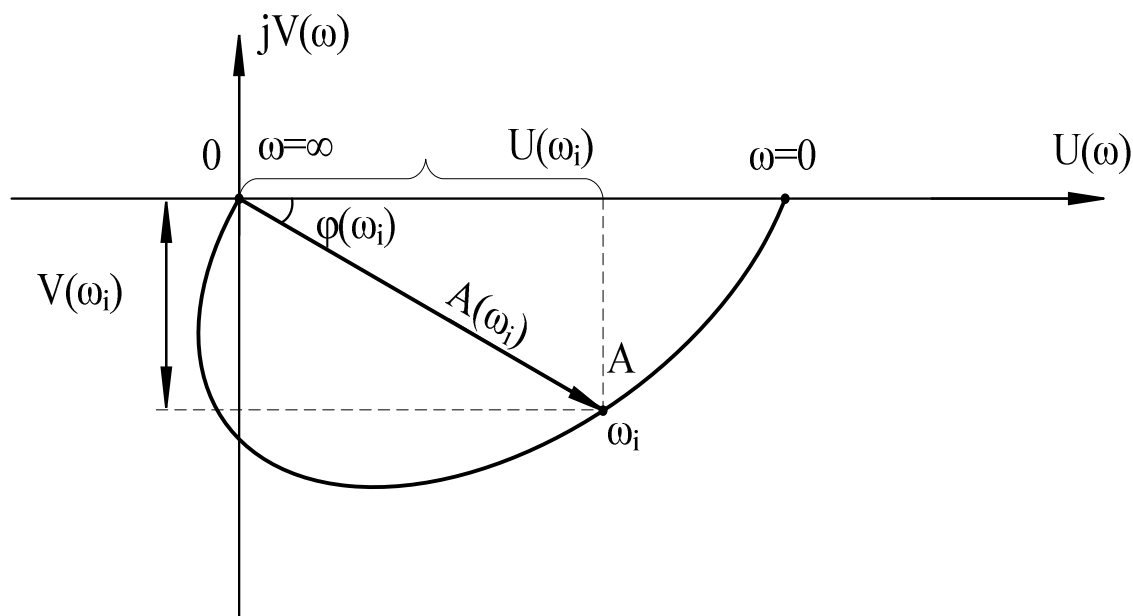


Рис.7.6. Побудова АФХ по компонентах частотної функції

### 7.4 Частотні функції з'єднань ланок

Якщо відомі частотні характеристики окремих ланок, то можна побудувати і частотні характеристики їх з'єднань.

При паралельному з'єднанні частотна функція дорівнює сумі речової і уявної частин частотних функцій ланок

$$W(j\omega) = \sum_{i=1}^n U_i(\omega) + j \sum_{i=1}^n V_i(\omega) . \quad (7.6)$$

При цьому вектори  $A_i(\omega)$  можна графічно підсумовувати.

При послідовному з'єднанні слід перемножити модулі і скласти фази частотних функцій

$$A(\omega) = \prod_{i=1}^n A_i(\omega) ; \quad \varphi(\omega) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(\omega) . \quad (7.7)$$

При охопленні ланки зворотним зв'язком результуючу частотну характеристику отримують за допомогою спеціальних номограм.

### 7.5 Логарифмічні частотні характеристики

При дослідженні систем управління частотні характеристики зручно будувати в логарифмічних координатах по таких причинах: 1) у більшості випадків АЧХ ланок в логарифмічних координатах можна представити відрізками прямих ліній; 2) АЧХ ланцюжки ланок графічно підсумовуються.

АЧХ в логарифмічних координатах будується у вигляді залежності  $\lg A$  від  $\lg \omega$ , що зветься *логарифмічною амплітудно-частотною характеристикою* (ЛАЧХ), а фазова – у вигляді залежності  $\varphi$  от  $\lg \omega$ , що зветься *логарифмічною фазочастотною характеристикою* (ЛФЧХ).

При цьому за одиницю масштабу частоти береться *декада* – частотний інтервал, відповідний зміні частоти у 10 разів.

При побудові ЛАЧХ по осі ординат відкладають вихідну величину  $L(\omega)$ , вимірювану в *децибелах* (дБ). Бел – одиниця десяткового логарифма коефіцієнта посилення потужності сигналу. Один бел відповідає



посиленню потужності в 10 разів, 2 бела – в 100 разів, 3 бела – в 1000 разів і так далі

Оскільки потужність сигналу пропорційна  $A^2$ , то її посилення в белах в логарифмічних координатах дорівнює  $\lg A^2 = 2 \lg A$  (у децибелах –  $20 \lg A$ ). Таким чином –  $L(\omega) = 20 \lg A(\omega)$ .

Співвідношення  $A$  і  $L$  приведені у наступній таблиці

A	0,01	0,1	0,5	1,0	1,12	1,41	2,0	3,6	10	100
L, дБ	– 40	– 20	– 6	0	1	3	6	10	20	40

При побудові ЛФЧХ фаза відкладається по осі ординат в радіанах або кутових градусах в звичайному масштабі, оскільки фазове зрушення ланцюжка ланок дорівнює сумі фазових зрушень на окремих її ланках. При сумісному аналізі ЛАЧХ і ЛФЧХ на осі абсцис застосовують логарифмічний масштаб частоти в декадах або в октавах (одна октава відповідає зміні частоти в два рази).

Відзначимо, що при використанні логарифмічного масштабу крапка, відповідна  $\omega = 0$ , знаходиться в мінус  $\infty$ , а нулю на осі абсцис відповідає крапка  $\omega = 1$  рад/с.

## 8 СТІЙКІСТЬ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ

### 8.1 Поняття рівноваги і стійкості

Однією з основних умов працездатності САУ є її *стійкість*, тобто здатність системи повернутися в початковий стан після зняття або припинення зміни дії, що вивела її з цього стану. Поняття стійкості нерозривно пов'язане з поняттям рівноваги.

*Рівноважним станом* тіла (або системи) називається такий стан, в якому сума всіх зовнішніх дій дорівнює нулю. Рівноважний стан може бути стійким, нестійким і нейтральним.

Класичною ілюстрацією цього положення (рис.8.1) є поведінка кульки, поміщеної: на дно лунки (а), на вершину горба (б) і на горизонтальну площину (в). У кожному з цих випадків сума зовнішніх сил, що діють на кульку, дорівнює нулю і, отже, кулька знаходиться в стані рівноваги.

Проте, якщо в першому випадку після невеликого відхилення кулька через деякий час знов повертається в початкове положення рівноваги, то в другому він продовжуватиме відхилятися від нього, а в

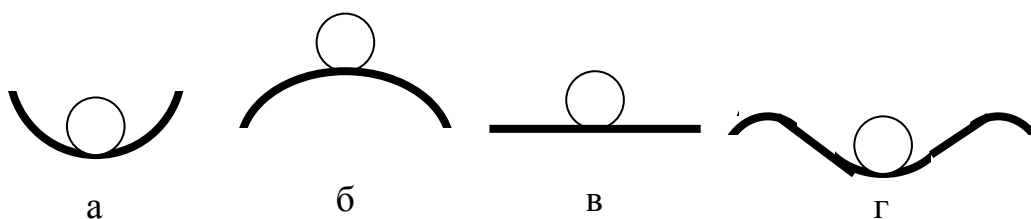


Рис.8.1. Механічна інтерпретація поняття стійкості

третьому – просто перейде в нове положення рівноваги, залежне від величини відхилення.

Крім того, така система може бути стійка при діях, що не виходять за певні межі, – «в малому», і нестійка при великих діях – «в цілому» (див. рис.8.1, г).

Розглянемо з цієї точки зору системи автоматичного управління.

Кожна САУ характеризується якимсь рівноважним станом, який порушується при зовнішніх діях. Це можуть бути сигнали управління, перешкоди і тому подібне. Під *стійкістю* САУ мається на увазі властивість системи повертатися до первинного стану після припинення дії, що вивела систему з цього стану.

Позначимо  $y(t_0)$ – значення вихідної величини в початковому рівноважному стані системи (у момент часу  $t = t_0$ ),  $y(t)$  – поточне значення вихідної величини після нанесення збурення  $f(t)$ .

САУ буде стійкою, якщо при  $t \rightarrow \infty$  величина  $y(t)$  прагне до свого початкового значення  $y(t_0)$  у разі  $f(t) = \text{const}$  або після зняття дії  $f(t) = 0$ .

Якщо при цьому амплітуда відхилення вихідної величини об'єкту управління не перевищує допустимих за технологією значень, а наявність її коливань не погіршує роботу агрегату – таку систему можна експлуатувати.

Нестійка система не повертається до **стану** рівноваги після закінчення або стабілізації дії, а безперервно віддаляється від нього або **здійснює неприпустимо** великі коливання.

**Відмітимо**, що нейтральні САУ, в яких після закінчення дії встановлюється новий **стан** рівноваги, відмінний від **первинного** і залежний від **проведеної** дії, є нестійкими.

Реальні системи **зазвичай** працюють в умовах безперервних дій, що змінюються, при цьому сталі режими взагалі відсутні. У таких випадках застосовують узагальнене визначення: «Система динамічно стійка, якщо її вихідна величина залишається в межах допустимих відхилень в умовах дій обмежених **збурень**».

У зв'язку з цим можна сказати, що системи автоматичного управління стійкі, якщо перехідні процеси, що **відбуваються** в них, сходяться. З'ясуємо, якими особливостями математичного опису систем визначається ця збіжність.

## 8.2 Математичні критерії стійкості

Перехідні процеси в системі описуються **загальним** вирішенням однорідного рівняння  $An(p)=0$  або

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

Це **рішення** є сумою експонент

$$y_C(t) = \sum_{k=1}^n C_k e^{Z_k t}.$$

Тут  $C_k$  – постійні інтеграції, а  $Z_k$  – коріння характеристичного рівняння  $a_n Z^n + a_{n-1} Z^{n-1} + \dots + a_1 Z + a_0 = 0$ .

У загальному випадку коріння  $Z_k$  є комплексними, утворюючи пари зв'язаного коріння  $-Z_{k,k+1} = \alpha_{до} \pm j\beta_k$ . Кожна пара коріння дає свою складову загального рішення у вигляді

$$y_k(t) = C_k e^{\alpha_k t} \sin(\beta_k t + \varphi_k).$$

Цими функціями є синусоїди з амплітудами, що змінюються в часі по експоненті. При цьому, якщо  $\alpha_{до} < 0$ , то  $k$ -я складова затухатиме. Навпаки, при  $\alpha_{до} > 0$  вийдуть коливання, що розходяться. Якщо  $\alpha_{до} = 0$  (уявне коріння), маємо незгасаючі стаціонарні коливання.

Таким чином, необхідною і достатньою умовою збіжності перехідних процесів і, отже, стійкості системи є від'ємність дійсної частини  $\alpha$  комплексного коріння  $Z_k$  її характеристичного рівняння.

Отже, умовою стійкості лінійної системи є розташування всіх коренів  $Z_k$ , які називають полюсами передаточної функції системи, в лівій комплексній напівплощині. Наявність кореня на уявній осі означає, що система знаходиться на межі стійкості.

**Обчислення** коріння просто лише для характеристичного рівняння 1-го і 2-го ступеня. Існують загальні вирази для коріння рівнянь 3-го і 4-го ступеня, але ці вирази громіздкі і їх неможливо застосувати для аналітичного дослідження впливу параметрів системи на її стійкість.

Тому використовуються правила, які дозволяють визначати стійкість системи без обчислення коренів. Ці правила називають *критеріями стійкості*. Всі вони математично еквівалентні, оскільки вирішують питання про знак дійсної частини коренів характеристичного рівняння. Критерії ділять на алгебраїчні і частотні.

Найбільш відомий критерій алгебри стійкості Рауса – Гурвиця, який дозволяє судити про стійкість системи по коефіцієнтах многочлена

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

По-перше, необхідною (але, недостатньою!) умовою стійкості є позитивність всіх коефіцієнтів  $a_n, \dots, a_0$ . Якщо хоч би один з коефіцієнтів менше нуля, то система нестійка і подальше дослідження не має сенсу.

Якщо  $a_1 > 0$ , то згідно критерію алгебри стійкості Гурвіця система стійка, якщо всі її визначники  $\Delta_i$  більше нуля.

Досліджують систему на стійкість по критерію Гурвіця таким чином. Для коефіцієнтів багаточлена складають квадратну матрицю  $n \times n$ , по головній діагоналі якої записують всі коефіцієнти від  $a_{n-1}$  до  $a_0$  і далі заповнюють її, як показано нижче. У разі відсутності даного коефіцієнта і якщо його номер більше  $n$  або менше нуля, на його місце проставляють нуль.

На головній діагоналі визначника **виявляються** послідовно всі коефіцієнти, **окрім**  $a_n$ .

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & \dots & 0 & 0 \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & a_n & a_{n-2} & \dots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_2 & a_0 \end{vmatrix}$$

Визначники Гурвіця складають так

$$\Delta_1 = a_{n-1} > 0; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} \\ a_n & a_{n-2} \end{vmatrix} \text{ і так далі}$$

Останній визначник включає всю матрицю. Але кожен подальший визначник може бути обчислений через попередній. Оскільки в стійкій системі  $\Delta_{n-1} > 0$ , то позитивність останнього визначника забезпечується, якщо  $a_0 > 0$ .

**Розглянемо** критерій Гурвіця для систем перших трьох **порядків**.

1) Для  $n = 1$  –  $An(p) = a_1 p + a_0$ , і умова стійкості інерційної ланки зводиться до нерівностей

$$a_1 > 0; \quad a_0 > 0.$$

2) Для  $n = 2$  –  $An(p) = a_2 p^2 + a_1 p + a_0$ ,

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & 0 \\ a_2 & a_0 \end{vmatrix} = a_1 a_0$$

Тому для ланки 2-го **порядку** умова стійкості має **вигляд** –

$$a_2 > 0; \quad a_1 > 0; \quad a_0 > 0.$$

Наприклад, ланка з передаточною функцією  $W(p) = k/(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)$  стійка, якщо перед всіма членами в знаменнику стоїть знак плюс.

3) Якщо  $n = 3$ , то  $A_n(p) = a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0$  і визначник Гурвіця –

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_2 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & a_2 & a_0 \end{vmatrix}.$$

В цьому випадку умови стійкості мають **вигляд** –

$$a_3 > 0; \quad a_2 > 0;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_2 & a_0 \\ a_3 & a_1 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_3 a_0 > 0;$$

$$\Delta_3 = a_0 \Delta_2 > 0.$$

Якщо  $\Delta_2 > 0$ , то  $a_0 > 0$ . Таким чином, умова стійкості зводиться до позитивності всіх коефіцієнтів і передостаннього мінору  $\Delta_2$ .

У загальному випадку системи будь-якого порядку *необхідною умовою стійкості* є вимога позитивності всіх коефіцієнтів  $a_i$ . Аналіз стійкості треба починати з перевірки цієї простої умови. Якщо воно не виконується, то відпадає необхідність в складанні і перевірці решти нерівностей.

Для характеристичних рівнянь невисоких **порядків** (до 3-го) **застосування** критеріїв алгебри досить просто. Якщо ж рівняння має високий **порядок** ( $n > 4$ ) або система включає ланку запізнювання, то застосувати критерії алгебри для дослідження стійкості систем скрутно.

У подібних випадках використовують *частотні критерії* (наприклад, критерій Міхайлова).

### 8.3 Області стійкості САУ у фазовому **просторі** параметрів

При аналізі САУ будують область стійкості системи в просторі варійованих параметрів. У випадку якщо параметрів два – область стійкості можна зобразити фігурою на площині з координатами. Наприклад, інерційної ланки – це коефіцієнт передачі  $k$  і постійна часу  $T$ . Вздовж межі області стійкості наноситься обернене всередину штрихування.

При більшому числі варійованих параметрів межа області стійкості представляє гіперповерхню у  $N$ -мірному просторі. При практичних розрахунках така область стійкості зображається у вигляді ліній в площині двох вибраних для аналізу параметрів при фіксованих значеннях решти характеристик САУ. Ці лінії геометрично є плоскими перетинами гіперповерхні.

Весь простір поза областю стійкості називається областю нестійкості.

Якщо САУ в просторі всіх своїх параметрів не має області стійкості, вона називається структурно нестійкою. Для досягнення стійкості такої системи необхідно змінити (скоректувати) її структуру.

## 9 ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

### 9.1 Склад і функції технічних засобів

Для практичної реалізації систем автоматизації застосовують різні технічні засоби. Їх кількість і склад визначаються конкретним завданням управління. Типовий комплекс технічних засобів представлений на Рис.9.1.





інформацію про хід керованого процесу через пристрої відображення і реєстрації. Зв'язок ПЗОД з ОК здійснюється за допомогою тих же ПЗО.

Як **засоби** ручного введення можуть використовуватися як стандартні для ЕОМ **засоби**: клавіатура, джойстик і тому подібне, так і різного роду задатчики, кнопки, перемикачі. **Засоби** відображення також можуть бути дисплеями і принтерами, **різноманітними** світловими і цифровими індикаторами, інформаційними табло, панелями, дзвінки і тому подібне

УОК – обчислювальний комплекс, що управляє, утворюють власне обчислювальний комплекс, ПЗО і **частина** ПЗОП, властива ЕОМ.

Прийнята **наступна** ієрархія технічних **засобів** АСУ:

- нульовий рівень – технологічні датчики і виконавчі механізми;
- нижній (1-й) рівень – програмовані логічні контролери (ПЛК);
- верхні (2-й і 3-й) рівні – промислові комп'ютери.

Відмітною особливістю **засобів** нижнього рівня є відсутність **пристроїв** зв'язку з оператором (**засобів** ручного введення і відображення інформації) і невеликий **об'єм** пам'яті. ПЛК застосовуються для регулювання окремих технологічних параметрів об'єкту управління.

**Засоби** другого рівня використовуються для **створення** АСУ ТП. Вони можуть працювати як в супервізорному режимі, видаючи **уставки** контролерам нижнього рівня, так і в режимі безпосереднього цифрового управління, **надаючи** дії, що управляють, прямо на виконавчі **пристрої**.

Комп'ютери третього рівня застосовуються в автоматизованих системах управління виробництвом (АСУВ). Вони завантажені **завданнями** комплексного управління ділянками, цехами і вирішенням стратегічних **завдань** підприємства.

Зразкові функції сучасних ТЗА:

- масштабування вхідних і вихідних сигналів;
- гальванічне **розділення** сигналів;
- виконання математичних і логічних операцій, нелінійних і динамічних перетворень
- дистанційна зміна статичних і динамічних параметрів локальних систем регулювання (по команді УОК або оператора);

- ненаголошений перехід від ручного управління до автоматичного і назад;
- поєднання пристроїв, що використовують різні види енергії.

## 9.2 Загальні вимоги до ТЗА

- *Висока надійність* – час напрацювання на відмову сучасних ТЗА складає десятки тисяч годинників (тобто декілька років).
- *Ремонтпридатність і зручність обслуговування* – час пошуку і усунення несправності має бути мінімальним, щоб об'єкт управління не встиг вийти з-під контролю.
- *Уніфікація* – можливість застосовувати техніку різних виробників, не піклуючись про її конструктивну, електричну і програмну сумісність.
- *Прийнятна вартість.*

## 9.3 Вимоги до технологічних датчиків

Датчики, зазвичай, є найвужчим местом у складі технічних засобів автоматики. Без їх надійної і якісної роботи навіть найдосконаліші УОК не справляться з управлінням. Не дарма автоматники вважають, що хороші датчики при створенні нової системи – це половина успіху.

Умови роботи датчиків найбільш важкі – адже їх встановлюють в безпосередній близькості від технологічного устаткування. У зв'язку з цим до датчиків пред'являються додаткові вимоги:

- *Достатня точність вимірювання.* Звернемо увагу: не “максимальна”, а “достатня”. Точні датчики – вельми дороге задоволення, і завищені вимоги по точності обходяться недешево.
- *Достатні межі вимірювання* із заданою точністю. При виборі меж вимірювання датчиків рекомендується користуватися правилом „1/3 шкали”.
- *Адаптується до умов роботи на об'єкті управління.*

- *Достатня відстань* для передачі інформації від датчика. Недотримання цієї вимоги спричинить необхідність установки на об'єкті проміжних підсилювачів сигналу, що здорожить систему і зробить її менш надійною.
- *Безпека* для персоналу при експлуатації і обслуговуванні.

#### 9.4 Виконавчі пристрої і вимоги до них

Типова схема реалізації дій, що управляють, представлена на Рис.9.2.



Рис.9.2. Типова схема реалізації дій, що управляють:

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач; П – підсилювач;

ПП – пусковий пристрій (пускач); РО – регулюючий орган об'єкту управління (решта позначень приведена раніше).

У автоматизованих системах управління і регулювання до виконавчих пристроїв відносять пускові пристрої і, власне, виконавчі механізми.

***Пускові пристрої забезпечують посилення потужності сигналів, що управляють, поступають від ОК при автоматичному режимі, або від оператора – при ручному управлінні. У додатку (таблиця П.1) приведена номенклатура основних електричних пускових пристроїв.***

*Виконавчі механізми* служать для переміщення регулюючих органів об'єкту при дії сигналів, що управляють. У системах прямої дії переміщення регулюючого органу здійснюється за рахунок енергії вхідного сигналу, в системах побічної дії – стороннім джерелом енергії.

По формі енергії для реалізації сигналу управління розрізняють:

*Пневматичні системи* – екологічно чисті, їх виконавчі механізми володіють великими перестановочними зусиллями. Проте пневмосистеми галасливі, тому вони вимагають хорошої герметизації ліній, а також ретельною воздухопідготовки (очищення і осушення).

*Гідравлічні системи* мають хороші динамічні характеристики, але вимагають двопровідних ліній зв'язку і, так само як пневматичні, діють на обмеженій відстані.

*Електричні системи* дозволяють передавати сигнали управління на великі відстані, легко реалізують складні закони управління, але вибухонебезпечні, інерційні і, тому, вимагають додаткових заходів по поліпшенню динамічних характеристик (знижуючі редуктори, гальма).

До електричних ВМ відносяться реле, електромагніти, електродвигуни, електромагнітні муфти; до гідравлічних – поршневі і плунжерні циліндри, в пневматиці використовуються поршні, діафрагми і сільфони.

У електричних САУ використовуються найчастішим електричні виконавчі механізми типу МЕО – *механізми електричні оборотні*, які управляються контактними або безконтактними пускачами. Вони складаються з двофазного асинхронного електродвигуна, багатоступінчатого редуктора, електромагнітного гальма і датчиків переміщення. Кут повного переміщення вихідного валу може встановлюватися в діапазоні до 90 або до 240 градусів.

У позначенні МЕО указуються послідовно три величини:

Мкр – номінальний момент, що крутить, на вихідному валу (діапазон значень: 4; 10; 25; 63; 160 і 400 кгс·м);

Твм – номінальний час повного ходу вихідного валу виконавчого механізму від мінімуму до максимуму (10; 25; 63 і 160 с);

Фвм – номінальний повний хід вихідного валу виконавчого механізму (0,25 і 0,63 обороту).

Приклади позначення: МЕО–4/10–0,25; МЕО–4/25–0,63.

Часто створюють *комбіновані системи* управління з використанням, наприклад, електро–пневматичних або електро–гідравлічних виконавчих механізмів. При цьому кожен тип виконавчого механізму розрахований на роботу в комплекті з певним типом пускового пристрою.

Основні вимоги, що пред'являються до виконавчих механізмів:

- Достатня потужність, що забезпечує дію регулюючих органів об'єкту у всіх режимах роботи.

- Достатня швидкодія.
- Лінійність статичних характеристик і мінімальні зони нечутливості.
- Просте і економічне регулювання вихідної величини, мала споживана потужність.

### **9.5 Регулюючі органи**

Для зміни витрати газу, пара і рідини в теплових агрегатах служать *регулюючі органи*: клапани, шибери, крани і заслінки. Клапани і шибери є дросельними регулюючими органами, що впливають на витрату середовища шляхом зміни прохідного перетину трубопроводу, борова або якогось іншого каналу.

Для регулювання потоків повітря або газу при низькому статичному тиску (до 10 кПа) використовуються поворотні регулюючі заслінки і шибери. При малих діаметрах трубопроводів можна застосовувати поворотні заслінки з умовними діаметрами до 500 мм для регулювання потоку повітря, газу і пари із статичним тиском до 2,5 МПа.

Для регулювання потоків рідин, газу і пари при високому статичному тиску використовують регулюючі клапани (крани). При цьому односідельні нерозвантажені клапани зазвичай застосовуються при Ду до 50 мм.

Для регулювання тиску в печах і розподілу продуктів згорання в боовах встановлюють поворотні клапани (шибери). При температурі регульованого середовища більше 700<sup>0</sup>С слід застосовувати водяне охолодження.

Вибір регулюючого органу визначається:

- 1) видом регульованого середовища (газ, пара, рідина і тому подібне);
- 2) параметрами регульованого середовища: тиском, температурою, агресивністю, запиленою, вологістю і т.д.;
- 3) величиною регульованої витрати і діапазоном його зміни;
- 4) умовами розміщення, монтажу і експлуатації;
- 5) номенклатурою пристроїв, що випускаються.

Розмір регулюючого органу вибирається по умовному діаметру його вхідного перетину  $D_u$ , що визначається розрахунковим шляхом.

У додатку (таблиця П.1) приведена номенклатура основних регулюючих органів, які застосовуються в теплових агрегатах.

## 9.6 Розробка технічних засобів автоматизації

Для оптимального задоволення технологічних запитів при одночасному обмеженні функціонального і конструктивного різноманіття ТЗА застосовують їх стандартизацію, основними методами якої є агрегування, блоково-модульний принцип побудови АСУ і уніфікація.

Принципи агрегування і блоково-модульної компоновки засновані на розкладанні завдань управління на однотипні операції, що повторюються, які можуть бути реалізовані мінімальним набором технічних засобів, що серійно виготовляються, у вигляді модулів і блоків, з подальшим синтезом з них систем управління.

Блоком називають пристрій, що виконує задані операції по перетворенню інформації. Модулем є уніфікований вузол, що забезпечує виконання типових операцій у складі блоку.

Уніфікація технічних засобів дозволяє обмежити різноманіття параметрів і технічних характеристик, конструктивних особливостей виконання, принципів дії і схемних вирішень засобів автоматизації.

Принцип агрегування передбачає створення складних пристроїв методом нарощування і стиковки. При побудові АСУ використовуються типові алгоритми вимірювання, контролю, діагностики, управління, що реалізуються на обмеженому базисі технічних засобів, які відносяться до Державної системи промислових приладів і засобів автоматизації (ДСП).

ДСП – це сукупність технічних засобів, призначених для отримання, обробки і використання інформації, забезпечуючих інформаційне (метрологічне і функціональне), енергетичне і конструктивне сполучення виробів у вимірювальні, інформаційні і такі, що управляють системи. Вимоги ДСП гарантують точність, надійність, довговічність ТЗА.

Склад, типи **пристроїв** ДСП і їх характеристики визначаються параметричними **рядами** виробів (понад 2000 типів промислових приладів і **засобів** автоматизації, близько 200 стандартів, більше 20 агрегатних комплексів) При проектуванні АСУ використовують каталоги ДСП, які постійно **поповнюються** новими **зразками** ТЗА.

## 10 АВТОМАТИЧНІ РЕГУЛЮЮЧІ ПРИБОРИ

Необхідна якість регулювання залежить від умов протікання технологічного процесу і роботи агрегату. Воно повинне забезпечити точність підтримки технологічного режиму і його економічну ефективність.

В кожному випадку визначають найбільш істотні *показники якості* перехідного процесу, які необхідно забезпечити насамперед. Найчастіше, це максимальне динамічне відхилення, час регулювання або інтегральний показник.

### 10.1 Типові оптимальні перехідні процеси регулювання

**Розглянемо** систему управління, в **завданні** якої входить підтримка заданого значення вихідної величини при різних зовнішніх діях. **Зазвичай** прагнуть реалізувати один з трьох типових оптимальних процесів регулювання.

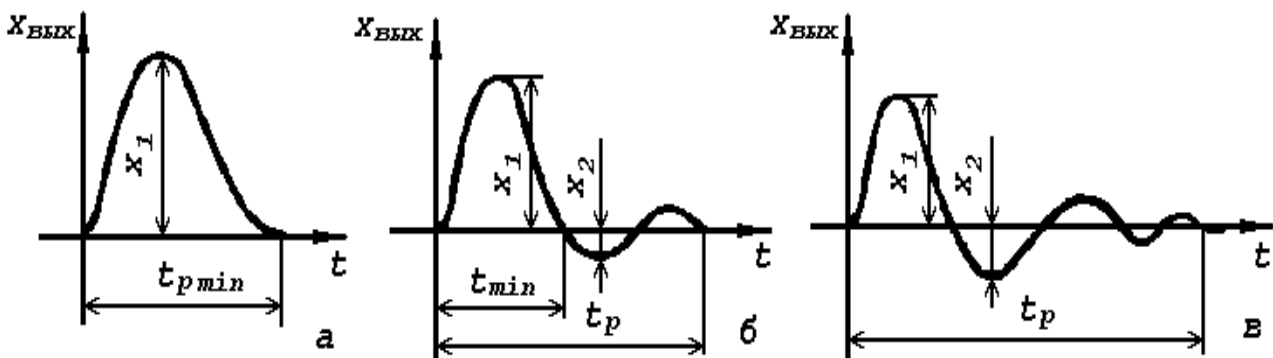


Рис.10.1. Типові оптимальні перехідні процеси регулювання

1) Аперіодичний процес з мінімальним часом регулювання. Характеризується мінімальною величиною загального часу регулювання  $t_p$  і мінімальною регулюючою дією. Застосовується при великому допустимому динамічному відхиленні регульованої величини  $y_1$  (рис.10.1,а).

2) Процес з 20%-ним перерегулюванням і мінімальним часом першого напівперіоду коливань рекомендується застосовувати в тих випадках, коли допускають певну величину перерегулювання (співвідношення  $y_2/y_1$ ), але пред'являють жорсткіші, ніж у попередньому випадку, вимоги до величини динамічного відхилення  $x_1$  (рис.10.1,б).

3) Процес з мінімальним квадратичним інтегральним показником ( $\min \int x^2 dt$ ) характеризується найбільшими перерегулюванням ( $y_2/y_1 = 40.45\%$ ) і  $t_p$  часом регулювання, та зате мінімальною величиною динамічного відхилення  $y_1$  (Рис.10.1,в).

## 10.2 Закони регулювання і автоматичні регулятори

Для реалізації цих перехідних процесів в САУ реальними об'єктами застосовують автоматичні регулятори – спеціальні автоматичні пристрої, що підключаються до об'єкту регулювання, які забезпечують підтримку заданих значень його регульованих величин або зміну їх по певному закону.

На рис.10.2 приведена схема простої системи управління з регулюючим пристроєм РП.

Законом (алгоритмом) регулювання називають математичну залежність між вихідним регулюючою дією  $Y_p$  і вхідним відхиленням  $X_p$  регульованої величини  $Y$  від заданого значення  $Y_0$

$$Y_p = f(X_p), \text{ де } X_p = Y_0 - Y.$$



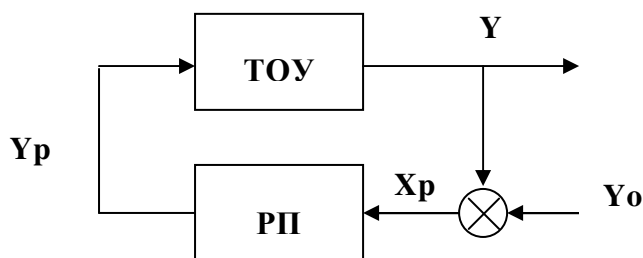


Рис.10.2. Схема системи управління

У ідеальних умовах роботи САР (лінійність характеристики об'єкту, стаціонарність випадкових збурень, мала інерційність регулятора в порівнянні з об'єктом) регулятор повинен мати лінійну передаточну функцію

По характеру роботи регулятори діляться на безперервні, імпульсні і релейні. Найбільш широкого поширення набули регулятори безперервної дії, що використовують лінійні закони регулювання вигляду

$$y_p = C_1 x_p + C_2 \int_0^t x_p dt + C_3 \frac{dx_p}{dt}, \quad (10.1)$$

де  $C_i$  – налаштування регулятора.

Розрізняють три типові закони регулювання:

П – пропорційний; І – інтегральний; Д – диференціальний.

Для управління реальними об'єктами в сучасних регулюючих пристроях реалізуються також наступні комбінації цих законів:

ПІ – пропорційно–інтегральний;

ПД – пропорційно –диференціальний;

ПІД – пропорційно –інтегрально–диференціальний.

Налаштуваннями безперервних регуляторів П–, І–, ПІ–, ПД– і ПІД– регулювання.

Відповідно до законів регулювання, що реалізуються, регулятори безперервної дії діляться на наступні типи.

1. Пропорційні або П–регулятори, в яких вихідна величина  $Y_p$  пов'язана з вхідною величиною  $X_p$  співвідношенням  $Y_p = K_p \cdot X_p$ . Передаточна функція –  $W_p(p) = K_p$ , де  $K_p$  – коефіцієнт передачі регулятора.

Кожному значенню регульованого параметра  $Y$  відповідає певне значення відхилення  $X_p$ . При відхиленні  $Y$  від заданого значення  $X_0$ , на виході відразу виникає зміна регулюючої дії  $Y_p$ , що **приводить** до  $W_{\text{и}}(p) = \frac{1}{T_{\text{и}} p}$  відновлення заданої величини  $Y$ . Така жорстка залежність між вхідною і вихідною величинами **приводить** до статичної помилки системи

$X_{\text{ст}} = Y_{\text{уст}} - X_0$ , яка назад **пропорційна**  $K_p$ .

**Зате** П-регулятори прості, працюють швидко і стійко.

2. Інтегральні або І-регулятори, у яких зміна вихідної величини **пропорційна** інтегралу зміни вхідної величини

$$Y_p = \frac{1}{T_{\text{и}}} \int_0^{\tau} X_p d\tau$$

**Передаточна**

функція І-регулятора

$$Y_p = \frac{1}{T_{\text{и}}} \int_0^{\tau} X_p d\tau$$

На рис.10.3 приведені перехідна характеристика І-регулятора (а) і перехідний процес в ТОУ при реалізації І-закону регулювання (б).

Постійна часу інтеграції (час ізодрома – перебудови)  $T_i$ , від величини якої залежить кут (перехідної характеристики  $Y_p(t)$ ).

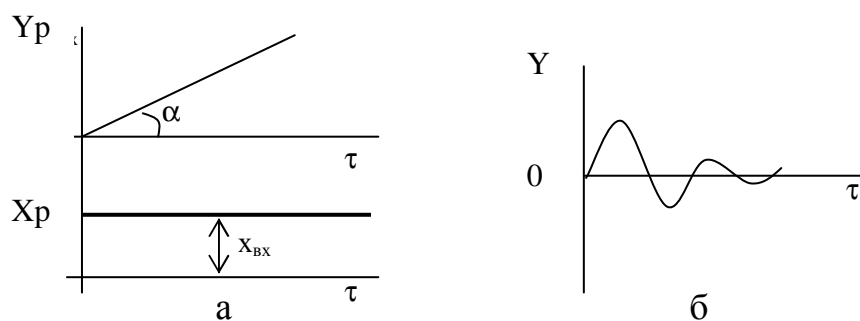


Рис.10.3. Перехідна характеристика І-регулятора (а) і перехідний процес в ТОУ при реалізації І-закону регулювання (б)

При цьому законі регулювання швидкість переміщення регулюючого органу пропорційна відхиленню регульованої величини  $Y$  від заданого значення  $X_0$ . Відсутня жорстка залежність між  $X_p$  і  $Y$ , тому статична помилка дорівнює нулю.

Цей регулятор виграє по точності, але програє по швидкодії і стійкості роботи. Таким системам регулювання властива та, що висока коливає перехідного процесу.

I-регулятори застосовують для управління малоінерційними об'єктами з невеликим часом запізнювання і істотним самовыравнюванням.

3. Пропорціонально-інтегральніе або Пі-регулятори, у яких зміна вихідної величини пропорційна як зміні вхідної величини, так і інтегралу її зміни

$$y_p = k_p \left[ x_p + \frac{1}{T_i} \int_0^t x_p dt \right],$$

де  $T_i$  – час інтеграції, протягом якої регулююча дія, обумовлена роботою П-складовою, буде подвоєна під дією I-складовою регулятора (див. Рис.10.4).

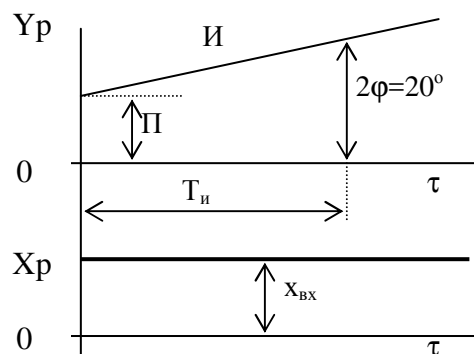


Рис.10.4. Перехідна характеристика Пі-регулятора

### Передаточна функція Пі-регулятора

$$W_{\text{пи}}(p) = \frac{k_p (T_i p + 1)}{T_i p}.$$

По швидкодії цей регулятор ближче до пропорційного, чим до інтегрального. При цьому I-часть усуває статичну помилку регулювання.

4. Пропорційно–дифференціальні або ПД–регулятори, які **надають** сумарну дію на регулюючий орган, **пропорційну** як відхиленню регульованої величини, так і швидкості її відхилення

$$y_p = k_p \left( x_p + T_d \frac{dx_p}{dt} \right),$$

де  $T_d$  – час передування (диференціювання), с.

**Передаточна** функція ПД–регулятора має **вигляд**

$$W_{пд}(p) = k_p (1 + T_d p).$$

**Введення** Д–часті доцільно при управлінні об'єктами, в яких сильно виявляється швидкість відхилення регульованої величини. Передуючу дію підвищує швидкодія системи, **але** не виключає статичну помилку.

5. У пропорційно–інтегрально–дифференціальних регуляторів (ПІД) зміна вихідної величини  $y_p$  пропорційно і відхиленню регульованої величини, і інтегралу цього відхилення, і його швидкості

$$y_p = k_p \left( x_p + \frac{1}{T_{и}} \int_0^t x_p dt + T_d \frac{dx_p}{dt} \right).$$

На Рис.10.5 **представлена** перехідна характеристика ПІД–регулятора.

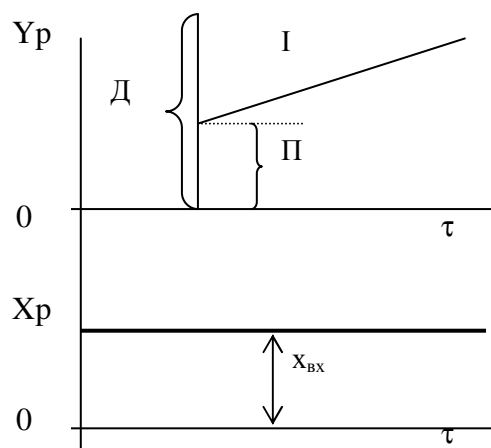


Рис.10.5. Перехідна характеристика ПІД–регулятора

**Передаточна** функція ПІД –регулятора

$$W_{\text{під}}(p) = K_p ( 1 + 1/ T_i p + T_d p )$$

або, після перетворення в канонічний вигляд –

$$W_{\text{під}}(p) = k_p \frac{T_i T_d p^2 + T_i p + 1}{T_i p} .$$

По характеру функціонування в САР цей закон із збільшенням  $T_d$  наближається до ПД, а при зменшенні  $T_i$  – до ПІ-закону.

ПІД-закон значно покращує якість регулювання, особливо при різких збуреннях. Проте такі регулятори – найскладніші по технічній реалізації і налаштуванню і, отже, найдорожчі.

### 10.3 Синтез законів регулювання

Закони регулювання реалізуються технічними засобами автоматизації (підсилювачами, виконавчими механізмами і диференціюючими і інтегруючими ланками, що коректують).

Наприклад, в простому випадку послідовного з'єднання підсилювальної ланки з передаточною функцією  $W_y(p) = K_y$  і виконавчого механізму з інтегруючою передаточна функція  $W_{\text{вм}}(p) = 1 / (T_{\text{ім}} \cdot p)$  дозволяє отримати І-закон регулювання

$$W(p) = W_y(p) \cdot W_{\text{вм}}(p) = K_y * 1 / (T_{\text{вм}} \cdot p) = 1 / (T_i \cdot p),$$

де  $T_{\text{ім}}$  – постійна часу виконавчого механізму.

Для синтезу складних законів регулювання (ПД, ПІ, ПІД) використовують методи підсумовування і/або зворотних зв'язків.

Так, структура ПІД-закону може бути реалізована просто паралельним з'єднанням (підсумовуванням) компонентів цього закону

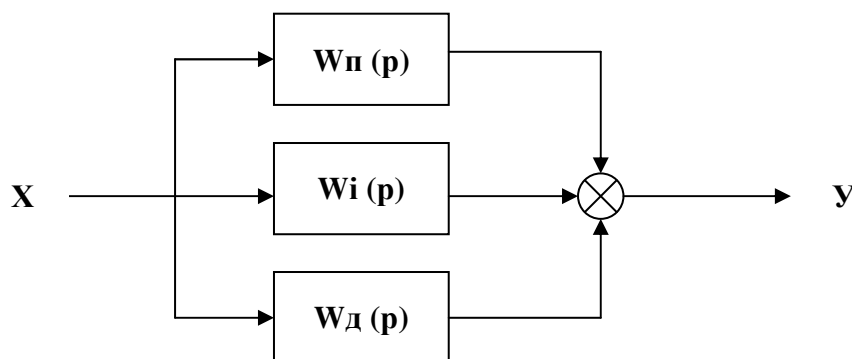


Рис.10.6. Реалізація ПІД-закона методом підсумовування

$$W_{\text{під}}(p) = W_{\text{п}}(p) + W_{\text{і}}(p) + W_{\text{д}}(p) =$$

$$= K_{\text{п}} + 1/T_{\text{і}} \cdot p + T_{\text{д}} \cdot p = K_{\text{п}} (1 + 1/T'_{\text{і}} \cdot p + T_{\text{пр}})$$

де  $K_{\text{п}}$ ,  $T_{\text{і}}$ ,  $T_{\text{п}}$  – коефіцієнт передачі, постійні часу ізодрома і передування, відповідно.

Методом зворотних зв'язків можна отримати закон будь-якої складності. При цьому підсилювальна ланка з коефіцієнтом передачі  $W_1(p) = K_{\text{у}}$  охоплюється негативним зворотним зв'язком (рис.10.7) з передаточною функцією  $W_{\text{зз}}(p)$ .

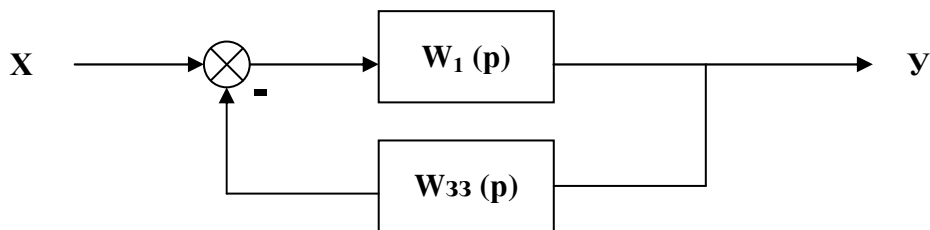


Рис.10.7. Реалізація законів регулювання методом зворотного зв'язку

Відповідно до правила зустрічно-паралельного з'єднання ланок, передаточна функція такої системи буде рівна

$$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 + W_1(p) W_{\text{зз}}(p)} = \frac{K_{\text{у}}}{1 + K_{\text{у}} W_{\text{зз}}(p)} = \frac{1}{\frac{1}{K_{\text{у}}} + W_{\text{зз}}(p)} = \frac{1}{W_{\text{зз}}(p)}$$

При  $K_{\text{у}} \gg 1$  – **передаточна** функція такої системи цілком визначається структурою і параметрами ланки зворотного зв'язку.

Наприклад

а) підсилювальна ланка з  $W_{\text{ос}}(p) = k_{\text{іс}}$  дає П-закон

$$W(p) = \frac{1}{W_{\text{зз}}(p)} = \frac{1}{k_{\text{зз}}} = k_{\text{р}}, \text{ де } k_{\text{р}} - \text{к-т передачі;}$$

б) ідеальна диференціююча ланка з  $W_{\text{зз}}(p) = T \cdot p$  реалізує І-закон

$$W(p) = 1 / W_{\text{зз}}(p) = 1 / (T p);$$

в) аперіодична ланка 1-го порядку –  $W_{зз}(p) = 1 / (T_p + 1)$  реалізує ПД-закон

$$W(p) = 1 / W_{зз}(p) = T_p + 1 ;$$

г) реальна диференціююча ланка з  $W_{ос}(p) = K_p T_p / (T_p + 1)$  дає Пі-закон

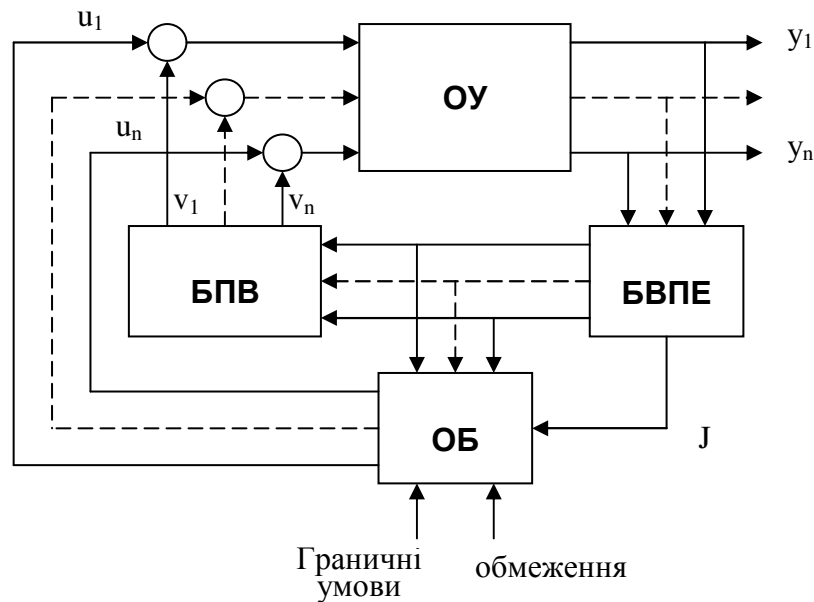
$$W(p) = 1 / W_{зз}(p) = (T_p + 1) / K_p T_p = K_y (1 + 1 / T_p), \text{ де } K_y = 1 / K_p .$$

При синтезі законів регулювання слід враховувати, що виконавчий механізм також бере участь в їх формуванні.

#### 10.4 Оптимальне управління

У ряді технологічних процесів показник якості, або ефективність, виражається в кожен момент часу функцією поточних значень параметрів системи. При цьому управління може вважатися *оптимальним*, якщо воно забезпечує утримання показника якості в точці екстремуму. Ця точка під впливом різних збурень може зміщуватися в якомусь певному напрямі, але при цьому невідомо, в якому саме напрямі слід впливати на регулюючий орган, щоб повернути систему до екстремуму. Зазвичай для здійснення екстремального управління виконуються спочатку невеликі пробні рухи, потім аналізується реакція на них системи і, за наслідками аналізу, виробляється дія, що управляє.

На рисунку 10.8 приведена функціональна схема оптимального управління з пошуком. Блок вимірювання показника ефективності (БВПЕ), що вимірює параметри процесу і що обчислює по ним показник якості  $J = f(y_1, \dots, y_n)$ , підключено до виходу об'єкту ОУ. Блок пробної дії БПВ генерує пробну дія  $v_1, \dots, v_n$  на регулюючі органи РО. Обчислювальний блок ОБ, отримуючи інформацію як про граничні умови, різні обмеження на параметри і введені дії, так і про зміну під їх впливом  $J$ , виробляє необхідні дії  $u_1, \dots, u_n$ .



10.8. Схема оптимального управління

## 11 МІКРОПРОЦЕСОРНА ТЕХНІКА

### 11.1 Синтез логічних пристроїв, що управляють

До цих пір ми розглядали динамічні системи, в яких вхідними і вихідними аналоговими сигналами є безперервні функції часу. У техніці і, особливо, в автоматичі поширені також системи, зміна стану яких відбувається скачками. При цьому розглядом перехідних процесів нехтують.

Математичні моделі, що відображають фізичні або абстрактні явища у вигляді кінцевих станів, називають *кінцевими автоматами (КА)*. Схема КА зображена на рисунку 11.1. Розрізняють два класи КА:

1) У *комбінаційних* схемах значення вихідних величин визначаються тільки комбінаціями значень вхідних параметрів, незалежно від їх послідовності (електронні ключі, шифратори/дешифратори).

2) Значення вихідних величин *послідовних логічних пристроїв* залежить від їх стану у момент зовнішньої дії – вони володіють «пам'яттю». Тому їх реакція диктується послідовністю зміни вхідних величин в часі. Це – лічильники, тригери, регістри пам'яті і тому подібне.

При розгляді логічної структури КА вважають, що вхідні і вихідні змінні змінюються миттєво в моменти часу, звані *тактами*. При цьому



інтервали між тактами ролі не грають. Такі особливі стани системи характеризуються внутрішніми змінними  $S(v)$ .

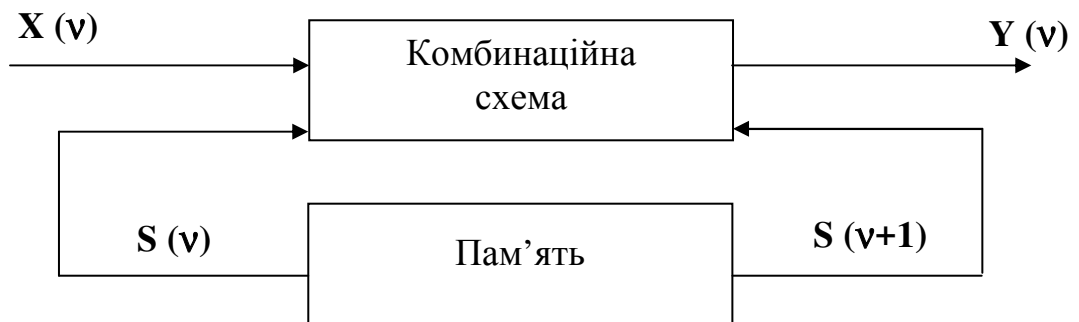


Рис.11.1. Схема кінцевого автомата

Робота КА описується характеристичними функціями, що задаються:

1) *таблицею переходів*  $S(v+1)$  – станів, в які переходить НО із стану  $S(v)$  при зовнішній дії  $X(v)$ .

2) *таблицею виходів*  $Y(v)$  – номерів виходів, які включаються при зовнішній дії  $X(v)$  на НО,  $S$ , що знаходиться в стани  $(v)$ .

На Рис.11.2 приведена схема КА на чотири входи.



Рис.11.2. Схема кінцевого автомата

Функціонування такого КА може бути описано характеристичними функціями в табличній і графічній формі.

Таблиця переходів

Стани	A	B	C	D
A	-	2 / 0	1 / 0	3 / 0
B	-	2 / 1	1 / 0	0 / 1
C	-	-	-	2 / 1
D	1 / 0 + 2 / 1	3 / 1 + 0 / 1	-	-

Граф є системою вершин (вузлів), які сполучені дугами – переходами (Рис.11.3). Його вершини – це стани КА, позначення на дугах – номер входу / номер виходу.

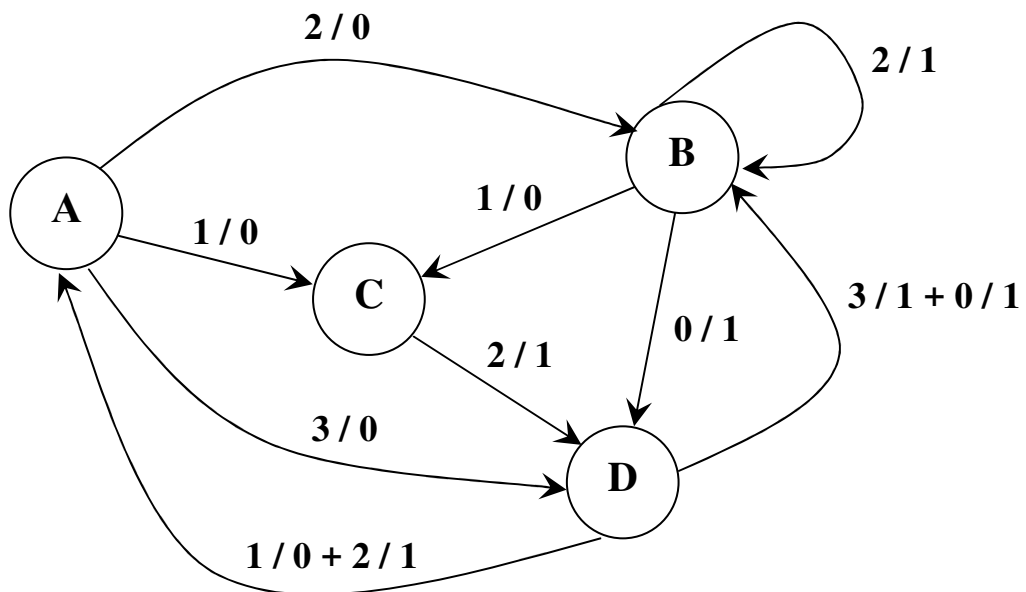


Рис.11.3. Схема кінцевого автомата

Залежність стану виходів системи від значень вхідних сигналів описується логічними (булевими) функціями. Вивченням цих функцій займається *математична логіка (булева алгебра)*, на основі законів якої і розробляються комбінаційні схеми логічних обчислювальних пристроїв, що управляють.

Вхідні і вихідні змінні мають два значення – лог.0 і лог.1. Наприклад, логічні функції однієї змінної можна представити таким чином:

повторення ( $y = x$ )    інверсія ( $y = \bar{x}$ )    ( $y = 0$ ) незалежність ( $y = 1$ )

x	y
0	0
1	1

x	y
0	1
1	0

x	y
0	0
1	0

x	y
0	1
1	1

Основні логічні функції містять дві вхідні змінні – **a** і **b**. Чотири можливі комбінації цих входів дають 16 комбінацій виходів.

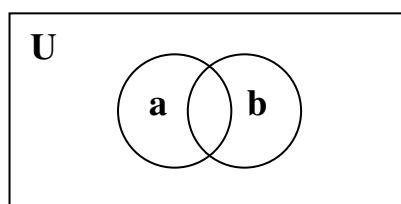
Таблиця функцій два змінних

Назва функції	Значення входів					Позначення	
	<b>a</b>	1	1	0	0	символьне	буквене
	<b>b</b>	1	0	1	0		
Нульова	0	0	0	0	0	<b>0</b>	
Стрілка Пірсу	0	0	0	1	1	$\overline{a + b}$ ( <b>a ↓ b</b> ) ↓	<b>ІЛІ-НЕ</b>
Заборона <b>a</b>	0	0	1	0	0	<b>b → a</b>	
Інверсія <b>a</b>	0	0	1	1	1	<b>a</b>	<b>НЕ a</b>
Заборона <b>b</b>	0	1	0	0	0	<b>a → b</b>	
Інверсія <b>b</b>	0	1	0	1	1	<b>b</b>	<b>НЕ b</b>
Нерівнозначність	0	1	1	0	0	<b>a ( b</b>	

Штрих Шеффера	0	1	1	1	$\overline{a \cdot b} (a \uparrow b)$	<b>I-НЕ</b>
Кон'юнкція	1	0	0	0	$a (b$	<b>I</b>
Рівнозначність	1	0	0	1	$a (b$	
Повторення <b>b</b>	1	0	1	0	<b>b</b>	
Імплікація <b>b</b>	1	0	1	1	$a \rightarrow b$	
Повторення <b>a</b>	1	1	0	0	<b>a</b>	
Імплікація <b>a</b>	1	1	0	1	$b \rightarrow a$	
Диз'юнкція	1	1	1	0	$a + b$	<b>АБО</b>
Одинична	1	1	1	1	<b>1</b>	

Графічні способи представлення логічних функцій:

1) *Круги Ейлера*. Вся безліч станів системи називається *універсум* і позначається прямокутником з буквою **U**. Кожен стан (подія) зображається кружком з найменуванням входу (**a**, **b**).



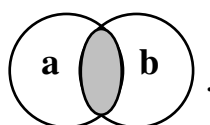
2) *Діаграми Вейча* – графічне зображення таблиці станів системи. Така таблиця складається з груп клітинок (розташованих по рядках або по стовпцях), в яких відповідні входи приймають значення лог.0 або лог.1. При цьому в самих клітинках указують значення виходу (0 / 1). Наприклад, кон'юнкція два змінних **a** і **b**

$$\mathbf{b = 0 \quad b = 1}$$


---

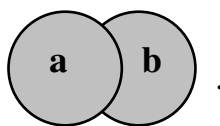
$a = 0$	0	0
$a = 1$	0	1

Логічний добуток  $a \cdot b$  ( кон'юнкція **I** ) в булевій алгебрі позначається і зображається групами Ейлера як перетин подій



Заперечення кон'юнкції **I-НЕ** називають «штрихом Шеффера»  $a \uparrow b$ .

Логічна сума  $a + b$  ( диз'юнкція **АБО** ) в булевій алгебрі позначається і зображається групами Ейлера так



Заперечення диз'юнкції **АБО-НІ** називають «стрілкою Пірсу»  $a \downarrow b$ .

Серед можливих логічних функцій найбільш важливі для розробки пристроїв, що управляють, так звані *нормальні форми*:

1) *кон'юнктивна (КНФ)* – добуток сум вхідних параметрів, яким відповідають помилкові значення вихідної величини, –  $y = 0$  ;

2) *диз'юнктивна (ДНФ)* – сума добутків вхідних параметрів, яким відповідають вірні значення вихідної величини, –  $y = 1$ .

Причому, якщо в кожному членові нормальної функції представлені всі вхідні параметри (у прямому або інверсному вигляді), маємо *досконалу нормальну форму* (СКНФ або СДНФ).

Наприклад, алгоритм ухвалення рішення голосуванням трьох чоловік (a, b, з) можна представити у вигляді наступної таблиці відповідності.

a	b	z	y	
0	0	0	0	1) кон'юнктивна (твір сум) $y = (\bar{a} + \bar{b} + \bar{c}) \cdot (\bar{a} + \bar{b} + c) \cdot (\bar{a} + b + \bar{c}) \cdot (a + \bar{b} + \bar{c}) = 0;$
0	0	1	0	
0	1	0	0	
1	0	0	0	
0	1	1	1	2) диз'юнктивна (сума творів) $y = \bar{a}bc + a\bar{b}c + ab\bar{c} + abc = 1.$ Доданки нормальних форм називаються <i>термами</i> .
1	0	1	1	
1	1	0	1	
1	1	1	1	

До логічних висловів застосовні такі закони матлогіки:

	Кон'юнктивна форма	Диз'юнктивна форма
Переставний	$a ( b = b ( a$	$a + b = b + a$
Сполучний	$a(bc)= b(ac)= z(ab)$	$(a + b) + z = a + (b + z)$
Розподільний	$a ( ( b + z) = a ( b + a ( z$	$a + b ( z = (a + b)((a + z)$
Повторення	$a ( a = a$	$a + a = a$
Подвійній інверсії	$a = a$	
Нульової множини	$a ( 0 = 0$	$a + 0 = a$
Універсальної множини	$a ( 1 = a$	$a + 1 = 1$
Додатковій	$a ( a = 0$	$a + a = 1$
Де Моргана	$a ( b = a + b$	$a + b = a ( b$

Правила де Моргана формулюються таким чином:

1) кон'юнктивна форма – заперечення добутків дорівнює сумі заперечень;

2) диз'юнктивна форма – заперечення суми дорівнює добутку заперечень.

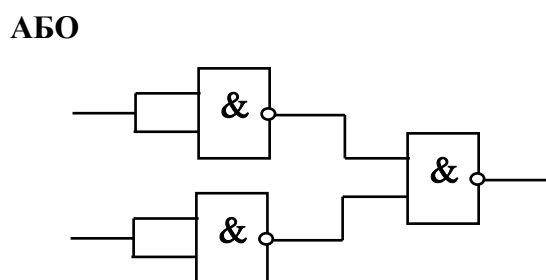
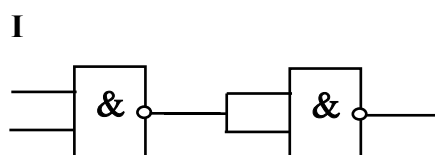
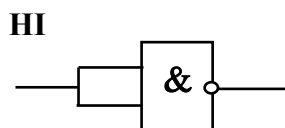
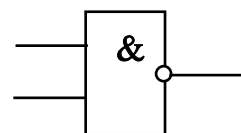
Покажемо, як можна отримати перше з цих правил:

a	b	ab	$\overline{ab}$	a	b	a + b
0	0	0	1	1	1	1
0	1	0	1	1	0	1
1	0	0	1	0	1	1
1	1	1	0	0	0	0

Ці правила важливі для спрощення (мінімізації) логічних виразів. Так, засновник математичної логіки англійський математик Буль запропонував все 16 функцій два змінних виразити через три функції: НІ, І, АБО, які називають *базисом Буля*. Потім було показано, що і ці базисні функції можна реалізувати за допомогою всього однієї функції І-НІ (штрих Шеффера).

Подивимося, як це можна зробити, користуючись умовними позначеннями логічних елементів на схемах. Функція двох змінних зображається прямокутником з двома входами (зліва) і одним виходом (справа). У середині прямокутника вказується умовне позначення операції: (& (І) – логічний добуток, + (АБО) – логічна сума. Світлий кружок на виході означає заперечення (інверсію НІ).

Таким чином, штрих Шеффера – функція І-НІ – може бути представлена у такому вигляді а функції базису Буля



При виконанні складних комбінаційних схем прагнуть обійтися мінімальною кількістю однотипних логічних елементів. Для спрощення логічних виразів зручно застосовувати спеціальні таблиці відповідності – *карти Карно*.

Хай задана логічна функція два змінних  $y = f(x_1, x_2)$  у вигляді наступної таблиці

x1	x2	y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

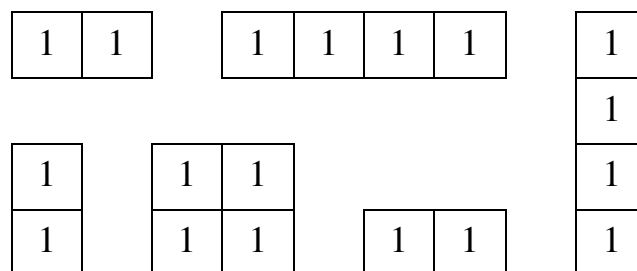
x2

	}	
x1 {		

Кожній комбінації (набору) вхідних змінних  $\{x_i\}$  можна поставити у відповідність клітку карти Карно. Позначення входів розташовують по зовнішніх сторонах карти напроти її рядків і стовпців, охоплюючи їх фігурними дужками. Кожен вхід ділить карту на дві рівні частини. У одній з них (напроти позначення змінної) значення входу істинне (лог.1), в іншій – помилково (лог.0).

В результаті, сусідні клітки відрізняються значенням лише однієї змінної  $x_i$ , причому при переході в сусідню клітку воно змінюється на протилежне (лог.0 / лог.1). У кожному клітку записується значення логічної функції у  $\{0 \text{ або } 1\}$ , відповідне набору входів.

По карті Карно можна скласти різні аналітичні вирази, що описують умову спрацьовування логічного пристрою  $y = f(x_i) = 1$ . Найпростіший вираз виходить при об'єднанні максимального числа кліток, лог.1, що містять, в правильні конфігурації, наприклад





Число  $m$  входів в термі, що описує правильну конфігурацію з  $n$  кліток в карті Карно на  $N$  входів, рівне

$$m = N - \log_2 n .$$

Для отримання простих логічних виразів по карті Карно:

1. Виділяємо правильні конфігурації максимальної площі, враховуючи, що конфігурації можуть перетинатися (тобто одна і та ж клітка може брати участь в різних конфігураціях). При цьому карту Карно можна «склеювати» в циліндр (як вертикально, так і горизонтально).

2. Кожну конфігурацію описуємо логічним добутком входів (кон'юнкцією).

3. Складаємо диз'юнктивну нормальну форму (ДНФ) логічної функції  $y = f(x_i) = 1$  у вигляді суми кон'юнкцій.

## 11.2 Мікропроцесорні системи

Управління технологічним процесом в металургійних агрегатах можна представити у вигляді послідовності логічних дій, що реалізують цілі управління. Тому в АСУ ТП давно широко застосовуються *логічні елементи*: тригери, лічильники, суматори, шифратори.

Логічні пристрої дискретної дії оперують *лог. 0* і *лог. 1*, які фізично є, відповідно, наявністю і відсутністю електричного імпульсу. При цьому *лог. 0* відповідає напрузі на лінії в діапазоні 2,4...6,0 В, а *лог. 1* – 0.....0,4 В.

Відповідно до правил математичної логіки логічний елемент формує вихідні сигнали, однозначно пов'язані з можливими комбінаціями вхідних сигналів.

Розвиток промислової електроніки привів до створення принципово нових ТЗА – *мікроконтролерів*, які засновані на мікропроцесорах і призначені для управління складними технологічними агрегатами.

Мікроконтролери (МК) використовуються у складі багатьох КВПіА, на основі яких створюються децентралізовані САУ. МК вбудовуються у верстати з ЧПУ, установки промислового телебачення, пристрої технологічної диспетчеризації і тому подібне В даний час МК широко

застосовуються не тільки в промисловості, але і в побуті: у телевізорах, відеомагнітофонах, НВЧ-печах, пральних машинах, годиннику, калькуляторах, мобільних телефонах.

Розглянемо базові поняття, які лежать в основі будь-якої **мікропроцесорної системи**, – від простого мікроконтролера до складного комп'ютера. Спершу декілька основних визначень базової термінології мікропроцесорної техніки.

- Електронна система – в даному випадку це будь-який електронний вузол, блок, прилад або комплекс, що проводить обробку інформації.

- Завдання – це набір функцій, виконання яких потрібне від електронної системи.

- Швидкодія – це показник швидкості виконання електронною системою її функцій.

- Гнучкість – це здатність системи підстроюватися під різні завдання.

- Надмірність – це показник ступеня відповідності можливостей системи вирішуваною даною системою завданню.

- Інтерфейс – угода про обмін інформацією, правила обміну інформацією, що мають на увазі електричну, логічну і конструктивну сумісність пристроїв, що беруть участь в обміні. Інша назва – сполучення.

Ядром будь-якої мікропроцесорної системи є мікропроцесор або просто процесор (від англійського processor). Перекласти російською мовою це слово найправильніше як «обробник», оскільки саме мікропроцесор – це той вузол, блок, який проводить всю обробку інформації усередині мікропроцесорної системи. Решта вузлів виконує всього лише допоміжні функції: зберігання інформації (у тому числі і інформації, що управляє, тобто програми), зв'язки із зовнішніми пристроями, зв'язки з користувачем і так далі

У широкому сенсі *мікропроцесором (МП)* є функціонально закінчений програмно-керований пристрій, що здійснює прийом, арифметико-логічну обробку і видачу цифровій інформації. По суті, МП – простий кінцевий автомат, який виконує операції з інформацією у вигляді електричних сигналів відповідно до закладеної в нього *програми*.

Порядок роботи мікропроцесора визначається програмою, що управляє, яка є набором команд, тобто цифрових код. Структура і об'єм системи команд процесора визначають його швидкодію, гнучкість, зручність використання. Всього команд у процесора може бути від декількох десятків до декількох сотень. Система команд може бути розрахована на вузький круг вирішуваних завдань (у спеціалізованих процесорів) або на максимально широкий круг завдань (у універсальних процесорів). Коди команд можуть мати різну кількість розрядів (займати від одного до декількох байтів). Кожна команда має свій час виконання, тому час виконання всієї програми залежить не тільки від кількості команд в програмі, але і від того, які команди використовуються.

Процесор виконує арифметичні функції (складання, множення і так далі), логічні функції (зрушення, порівняння, маскування кодів і так далі), тимчасове зберігання кодів (у внутрішніх регістрах), пересилку кодів між вузлами мікропроцесорної системи і багато що інше. Кількість таких елементарних операцій, що виконуються процесором, може досягати декількох сотень.

### 11.3 Структура і основні функції мікроконтролерів

МП складається з інтегральних мікросхем або є монокристалом (рис.11.4). Основою мікропроцесора є *арифметико-логічний пристрій (АЛП)*, в якому виконуються прості операції: складання і віднімання двійкових чисел, логічні операції І і АБО, переадресація даних.

Для зберігання програм використовуються ПЗП (ROM). Для зберігання проміжних результатів і допоміжних величин використовується оперативна пам'ять – ОЗУ (RAM). Але при виключенні живлення інформація в ОЗУ, як правило, пропадає. Крім того, в структуру процесора входять мультиплексори, буфери, регістри і інші вузли. Робота всіх вузлів синхронізується загальним зовнішнім тактовим сигналом процесора.

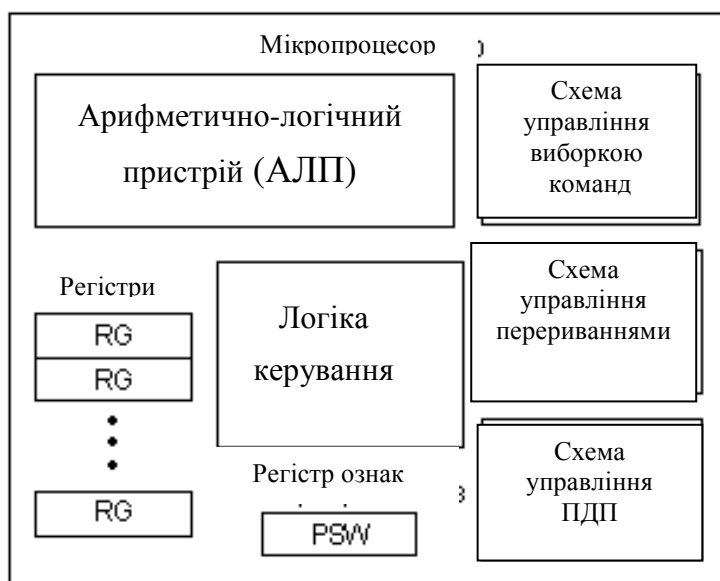


Рис.11.4. Структура мікропроцесорної системи

*Мікроконтролер (МК)* – це МП-система з пристроями введення-виводу інформації, переривання, таймерами, компараторами і тому подібне МК використовуються у складі багатьох КВПіА, на основі яких створюються децентралізованні САУ.

Процесор працює з портами введення/виводу (*port I/O*) практично так само, як і з елементами пам'яті. У кожного порту є своя власна адреса. Причому елементи пам'яті і порти знаходяться в різних *адресних просторах*.

*Порти виводу* призначені для управління зовнішніми пристроями (цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП), індикатори, принтери). До цих портів можна підключати *електронні ключі*, які дозволяють МП системі управляти могутнішими пристроями – електромагнітними реле, лампочками, світлодіодами, моторчиками, соленоїдами і тому подібне

За допомогою портів виводу можна робити перемикання в самій схемі мікропроцесорного пристрою для його автоматичного підстроювання під виконуване завдання.

*Порт введення* – це спеціальна схема, за допомогою якої МП може приймати зовнішні дані, наприклад, інформацію про хід технологічного

процесу або стан устаткування. Для її перетворення в цифровий код застосовуються спеціальні модулі, наприклад, ADAM фірми ADVANTECH. До портів підключають засоби ручного введення (клавіатуру, різні кнопки), дискретні і RS інтерфейси приладів, АЦП і так далі

Головним елементом всієї мікропроцесорної системи, що управляє, як указувалося, є процесор. Решта пристроїв («периферія») ж є веденими.

Для досягнення максимальної універсальності і спрощення протоколів обміну інформацією в *мікропроцесорних системах* застосовується так звана шинна структура зв'язків між окремими пристроями, що входять в систему.

Суть шинної структури зв'язків зводиться до наступного. При класичній структурі зв'язків (рис. 11.5) всі сигнали і коди між пристроями передаються по окремих лініях зв'язку. Кожен пристрій, що входить в систему, передає свої сигнали і коди незалежно від інших пристроїв. При цьому в системі виходить дуже багато ліній зв'язку і різних протоколів обміну інформацією.

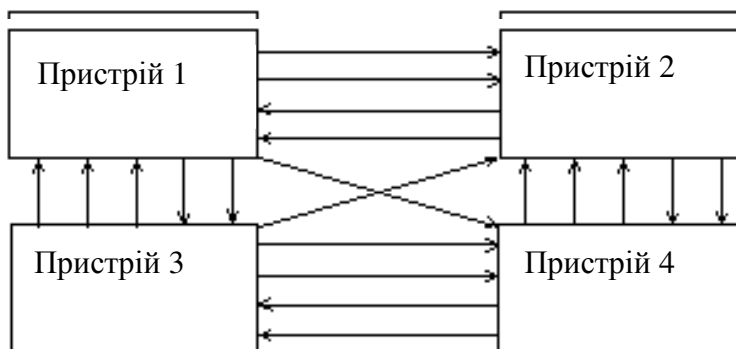


Рис.11.5. Класична структура зв'язків

При шинній структурі зв'язків (див. рис.11.7) всі сигнали між пристроями передаються по одних і тих же лініях зв'язку, але в різний час (так наз. мультиплексування передачі). Причому передача по всіх лініях зв'язку може здійснюватися в обох напрямках поперемінно (напівдуплексний режим) або одночасно (дуплексний режим). В результаті кількість ліній зв'язку істотно скорочується, а правила обміну (протоколи)

спрощуються. Група ліній зв'язки, по яких передаються сигнали або коди якраз і називається *шиною* (англ. bus).

Зрозуміло, що при шинній структурі зв'язків легко здійснюється пересилка всіх інформаційних потоків в потрібному напрямі, наприклад, їх можна пропустити через один процесор, що дуже важливе для *мікропроцесорної системи*. Проте при шинній структурі зв'язків вся інформація передається по лініях зв'язку послідовно в часі, по черзі, що знижує швидкодію системи в порівнянні з класичною структурою зв'язків.

Велика гідність шинної структури зв'язків полягає в тому, що всі пристрої, підключені до *шини*, повинні приймати і передавати інформацію по одних і тих же правилах (протоколам обміну інформацією по *шині*). Відповідно, всі вузли, що відповідають за обмін з *шиною* в цих пристроях, мають бути одноманітні, уніфіковані.

Істотний недолік шинної структури пов'язаний з тим, що всі пристрої підключаються до кожної лінії зв'язку паралельно. Тому будь-яка несправність будь-якого пристрою може вивести з ладу всю систему, якщо вона псує лінію зв'язку. З цієї ж причини відладка системи з шинною структурою зв'язків досить складна і зазвичай вимагає спеціального устаткування.

У системах з шинною структурою зв'язків застосовують всі три існуючі різновиди вихідних каскадів цифрових мікросхем:

- стандартний вихід або вихід з двома станами (позначається 2С, 2S, рідше TTL, TTL);
- вихід з відкритим колектором (позначається ОК, ОС);
- вихід з трьома станами або (що те ж саме) з можливістю відключення (позначається 3С, 3S).

Спрощено ці три типи вихідних каскадів можуть бути представлені у вигляді схем на рис. 11.6.

Біля виходу 2С два ключі замикаються по черзі, що відповідає рівням логічної одиниці (верхній ключ замкнутий) і логічного нуля (нижній ключ замкнутий). Біля виходу ОК замкнутий ключ формує рівень логічного нуля, розімкнений, – логічної одиниці. Біля виходу 3С ключі можуть замикатися по черзі (як у разі 2С), а можуть розмикатися одночасно,

утворюючи третє, високоімпедансне, стан. Перехід в третій стан (Z-состояние) управляється сигналом на спеціальному вході EZ.

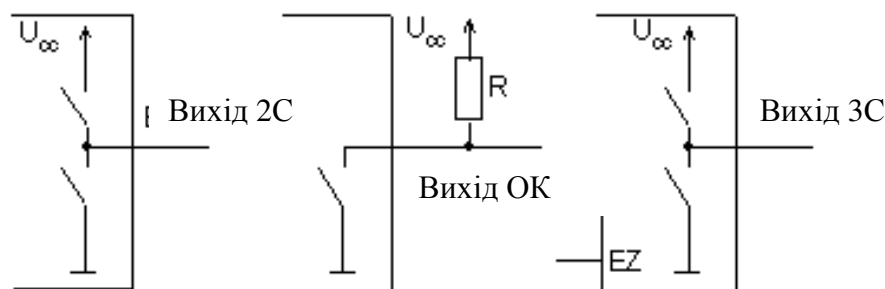


Рис.11.6. Три типи виходів цифрових мікросхем

Типова структура *мікроконтролера* приведена на рис. 11.7. Вона включає три основні типи пристроїв:

- центральний процесор (CPU – Central Processing Unit);
- оперативну *пам'ять* (ОЗП, RAM – Random Access Memory) і постійну *пам'ять* (ПЗП, ROM – Read Only Memory), яка служить для зберігання даних і програм;
- *порти введення/виводу* (Port I/O – Input/Output Devices), службовці для зв'язку *мікропроцесорної системи* із зовнішніми пристроями – прийому (введення, читання, Read) входних сигналів і видачі (виводу, запису, Write) вихідних сигналів.

Ці вузли сполучені між собою загальною системною шиною (магістраллю), по якій проводиться весь обмін інформацією в мікропроцесорній системі.

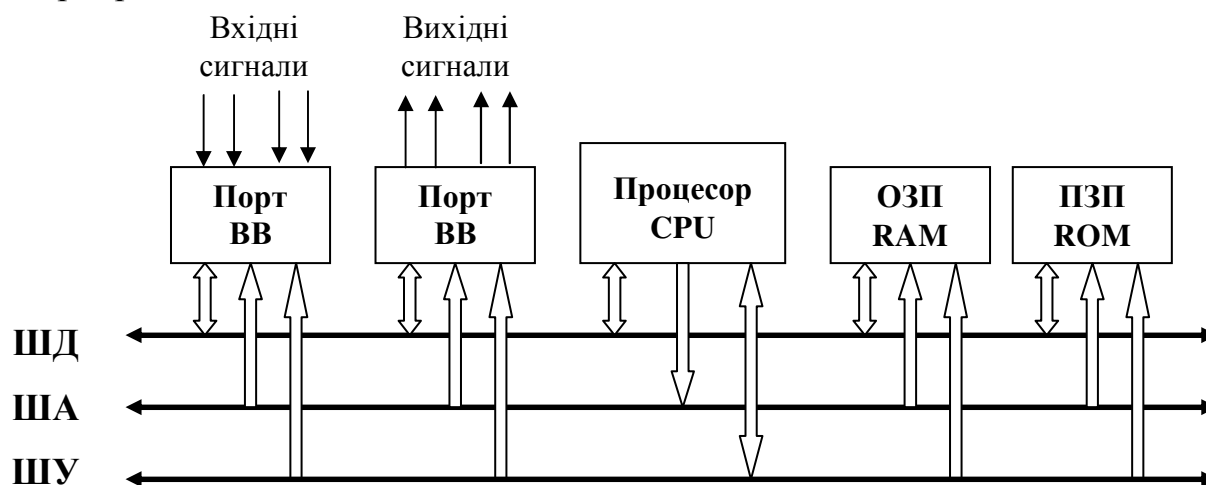


Рис.11.7. Схема передачі сигналів в мікропроцесорній системі

Системна магістраль включає чотири основні **шини** нижнього рівня, кожна з яких фізично є набором провідників (розрядів), по яких відбувається паралельна (одночасна) передача двійкових чисел в електронній формі.

#### ***Шина даних (Data Bus)***

Шина даних – це основна шина, яка використовується для передачі інформаційних код між всіма пристроями мікропроцесорної СИСТЕМИ. Зазвичай в пересилці інформації бере участь процесор, який обмінюється даними з периферійними пристроями або елементами ПАМ'ЯТІ. Але можлива також і передача інформації між пристроями без участі процесора.

Шина даних завжди двонаправлена. Вона повинна мати не менше восьми розрядів для передачі інформації по байтах (1 байт = 8 битий, 1 байт / з = 1 бод, 1 Кбайт = 1024 байт). 16-тиразрядная шина даних може за один такт передавати 2 байти, 32-розрядна шина – 4 байт, 64-розрядна – 8 байт.

#### ***Шина адреси (Addres bus)***

Ця шина служить для визначення адреси (номери) пристрою, з яким процесор обмінюється інформацією в даний момент. Кожному пристрою (окрім процесора), кожному елементу пам'яті в **мікропроцесорній системі** привласнюється власна адреса. Тому двійкові числа, передавані по шині адреси, є адресою елементу пам'яті або порту введення/виводу, до якого в даний момент звертається процесор.

Шина адреси може бути однонаправленою або двонаправленою. Мінімальна кількість розрядів адресної шини – 16.

#### ***Шина управління (Control bus)***

У шину управління умовно об'єднують набір ліній, передавальних сигнали, що управляють, від процесора до периферійних пристроїв. Кожен з цих сигналів має свою функцію. Деякі сигнали служать для стробування передаваних або таких, що приймаються даних (тобто визначають моменти



часу, коли інформаційний код виставлений на шину даних). Інші сигнали, що управляють, можуть використовуватися для підтвердження прийому даних, для скидання всіх пристроїв в початковий стан, для того, що тактує роботи пристроїв і тому подібне

Лінії шини управління можуть бути однонаправленими або двонаправленими. У будь-якій шині управління обов'язково присутні лінії, передаточні наступні сигнали:

RD (Read) – читання;

WR (Write) – запис;

MREQ – ініціалізація пристроїв пам'яті (ОЗУ або ПЗП);

IORQ – ініціалізація портів введення/виводу;

READY – готовність;

RESET – скидання.

Шина живлення (*Power Bus*) – на рисунку не показана.

Ця шина призначена не для пересилки інформаційних сигналів, а для живлення системи. Вона складається з ліній живлення і загального дроту. У мікропроцесорній системі може бути одне джерело живлення (частіше +5 В) або декілька (зазвичай ще –5 В +12 В і –12 В). Кожній напрузі живлення відповідає своя лінія зв'язку. Всі пристрої підключені до цих ліній паралельно.

По відношенню до будь-яких периферійних пристроїв, центральний процесор може виконувати в кожен момент часу одну з чотирьох основних операцій: читання або запис в елемент пам'яті, читання з порту введення і запис в порт виводу.

Наприклад, процес запису даних в пам'ять відбувається таким чином:

а) спочатку центральний процесор виставляє на адресну шину адресу елемента пам'яті;

б) потім на шину даних виставляється байт інформації, призначений для запису в цей осередок;

в) після чого активізується сигнал MREQ, що дає доступ до модуля пам'яті;

г) потім процесор встановлює сигнал WR в активний стан. Відбувається запис байта в адресований елемент пам'яті.

Для того, щоб прочитати байт з елемента пам'яті, процесор спочатку встановлює на шині даних адресу потрібного осередку. Потім він встановлює в активний стан сигнал MREQ, який поступає на пристрої пам'яті і служить дозволом для їх роботи. При цьому сигнал IORQ залишається рівним лог. 1, тому порти введення/виводу мікропроцесорної системи залишаються неактивними. Далі, процесор переводить в активний стан сигнал RD. Цей сигнал поступає як на пристрої пам'яті, так і на порти введення/виводу. Проте порти не реагують на нього, оскільки вони відключені високим рівнем сигналу IORQ.

Пристрій пам'яті, навпаки, отримавши сигнали RD і MREQ, що управляють, видає на шину даних байт інформації з того елемента пам'яті, адреса якої присутня у цей момент на шині адреси.

Операції читання з порту і запису в порт відбуваються аналогічно операціям читання/запису ОЗУ. Відмінність лише в тому, що замість сигналу MREQ в активний стан переходить сигнал IORQ, дозволяючий роботу портів.

Якщо інформація повинна пройти складну багатоступеневу обробку, то процесор може зберігати проміжні результати в системній оперативній пам'яті. У оперативній і постійній пам'яті знаходяться також і коди (команди виконуваної процесором програми), що управляють, які процесор також читає по шині даних з адресацією по шині адреси.

Постійна пам'ять використовується, в основному, для зберігання програми початкового пуску мікропроцесорної системи, яка виконується кожного разу після включення живлення. Інформація в неї заноситься виготівником мікропроцесора.

Пристрої введення/виводу теж можуть мати в своєму складі мікропроцесори, тобто бути спеціалізованими мікропроцесорними системами. Це дозволяє перекласти частину програмних функцій на ці пристрої введення/виводу, розвантаживши центральний процесор системи.

## **12 ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ КОМПЛЕКСИ, ЩО УПРАВЛЯЮТЬ**

### **12.1 Принципи побудови обчислювальних комплексів, що управляють**

Розвиток систем управління привів до включення в їх склад ЕОМ і створення обчислювальних комплексів (УОК), що управляють, які забезпечують отримання, перетворення, накопичення, обробку і видачу вимірювальної, командної і службової інформації у відповідній формі, зокрема для дії на об'єкт дослідження.

УОК є автоматизованим засобом вимірювань електричних величин, на основі якого можливе створення АСУ ТП шляхом приєднання до входу УОК датчиків з уніфікованим електричним вихідним сигналом, а до виходу – виконавчих пристроїв, а також генерації програм обробки інформації.

Таким чином, УОК – уніфіковане ядро АСУ ТП, що виконує такі функції:

- прями, непрямі і сукупні вимірювання технологічних параметрів;
- обробку вимірювальної інформації і вироблення дій, що управляють;
- управління процесом вимірювань і дія на об'єкт управління;
- представлення результатів управління технологічним об'єктом операторові в заданному вигляді.

Для реалізації цих функцій УОК забезпечують:

- сприйняття, перетворення і обробку електричних сигналів від первинних перетворювачів або безпосередньо від об'єкту;
- управління засобами вимірювань і іншими компонентами УОК ;
- генерацію сигналів, що управляють, для дії на об'єкт.

УОК створюється методом проектної компоновки з системно зв'язаних функціональних блоків і пристроїв, які випускаються серійно. Допускається модифікувати УОК доповненням або заміною і технічних, і програмних компонентів.

Специфіка АСУ ТП накладає свій відбиток на характер вимог, що пред'являються до електронного інтерфейсу. Він повинен, насамперед, забезпечувати гнучкість системи, тобто можливість її швидкої перебудови, заміни окремих пристроїв, оперативної зміни їх характеристик, підключення нових блоків. Для реалізації цих вимог сучасні стандарти на

інтерфейс, орієнтовані на використання в УОК, будуються з урахуванням принципів модульності, програмної керованості і магістральної організації.

*Модульність* передбачає виконання окремих елементів інтерфейсу, що здійснюють певні функціональні перетворення, у вигляді закінчених функціональних модулів спеціального призначення. Сукупність таких модулів повинна забезпечувати виконання основної частини завдань сполучення експериментального устаткування і вимірювальної апаратури з рештою всіх частин АСУ ТП, включаючи ЕОМ.

*Програмна керованість* модулів або автономних пристроїв УОК означає таку їх схемну реалізацію, яка дає можливість програмним шляхом, за допомогою певного набору команд, що подаються від спеціального блоку, що управляє, або ЕОМ, змінювати їх технічні характеристики і алгоритм функціонування. Тим самим програмна керованість елементів АСУ ТП дозволяє оперативно змінювати можливості всієї системи залежно від конкретних вимог.

*Магістральний принцип організації* передбачає наявність загальної системи електричних шин – магістралі, до якої підключаються окремі модулі, пристрої, а також ЕОМ. Звернення до того або іншого пристрою здійснюється шляхом вказівки його індивідуальної адреси. Наявність загальної магістралі спрощує підключення модулів, додаткових блоків, забезпечуючи гнучкість і мобільність УОК.

#### ***Основні ознаки УОК :***

- наявність комплексу нормованих метрологічних характеристик;
- блоково-модульна структура, вимірювальні і обчислювальні компоненти якої є серійні засоби вимірювань і автоматизації (СІА);
- наявність процесора або ЕОМ;
- програмне управління СІА від ЕОМ або процесора;
- використання типових інтерфейсів для забезпечення взаємодії між агрегатними СІА.

За призначенням УОК підрозділяються на типових, проблемних і спеціалізованих (таблиця 12.1).

Таблиця 12.1 – Класифікація УОК

Типові	Проблемні	Спеціалізовані
Для вирішення широкого круга завдань автоматизації вимірювань, випробувань або досліджень, незалежно від сфери застосування	Для вирішення широко поширених але специфічних завдань для конкретної області застосування	Для вирішення унікальних завдань автоматизації вимірювань, випробувань або досліджень

## 12.2 Технічні і програмні компоненти УОК

### *Склад технічних компонентів УОК*

*Основні технічні компоненти забезпечують процес вимірювання і обробку отриманої інформації. До них відносяться:*

- засоби вимірювань фізичних величин (вимірювальні компоненти);
- засоби передачі і введення-виводу цифрових і дискретних сигналів (компоненти, що пов'язують);
- засоби обчислювальної техніки (обчислювальні компоненти);
- засоби представлення інформації персоналу (інформаційні компоненти).

Вимірювальні компоненти, окрім специфічних вимог, повинні забезпечувати сумісність СІА один з одним і з обчислювальними компонентами.

Допоміжними технічними компонентами є наступні функціонально і технічно закінчені технічні засоби забезпечення спільної роботи основних технічних компонентів, такі, що безпосередньо не беруть участь в процесі управління:

- блоки електричного сполучення вимірювальних компонентів між собою і з обчислювальними компонентами (блоки інтерфейсного сполучення, контроллери);

- комутаційні пристрої, вимірювання, що не є засобами;
- спеціальні пристрої буферної пам'яті;
- розширювачі інтерфейсних ліній;
- джерела живлення для допоміжних компонентів.

Технічні компоненти повинні задовольняти вимогам:

- конструктивній, енергетичній, експлуатаційній і програмній сумісності;

- комплексу нормованих метрологічних характеристик.

### ***Состав програмних компонентів УОК***

Системне програмне забезпечення (ПЗ) і загальне прикладне ПЗ утворюють математичне забезпечення УОК і входять в комплект його постачання.

Системне ПЗ УОК – це сукупність ПЗ ЕОМ (процесора) і додаткових програмних засобів, що забезпечують:

- управління і обмін вимірювальною інформацією з вимірювальними компонентами;
- роботу в діалоговому режимі з УОК (при необхідності);
- перевірку працездатності окремих компонентів і УОК в цілому;
- зміна і доповнення складу загального прикладного ПЗ.

Додаткові програмні засоби створює розробник УОК, а забезпечує ними споживача – виготівник УОК.

### **Загальне прикладне ПЗ УОК є організованою сукупністю програмних модулів, що реалізують:**

- типові алгоритми обробки вимірювальної інформації;
- типові алгоритми управління технологічним об'єктом;
- метрологічне обслуговування УОК (перевірка, експериментальне визначення метрологічних характеристик вимірювальних каналів, їх метрологічна атестація).

Загальне прикладне ПЗ розробляється на основі системного ПЗ відповідно до затверджених замовником технічних умов на носіях інформації використовуваних обчислювальних компонентів і супроводиться експлуатаційною документацією по стандартах ЕСПД.

Спеціалізоване прикладне ПЗ – це програмні модулі обробки сигналів вимірювальної інформації, що реалізуються з метою отримання результатів прямих, непрямих, сумісних і сукупних вимірювань (наприклад, фільтрації, корекції погрішності, введення поправок, масштабування, обчислення функцій, вирішення рівнянь і тому подібне), і програмні модулі, що реалізують задані закони управління технологічним об'єктом.

### 12.3 Вимоги до УОК

- *Достатня продуктивність.* Необхідні для вироблення дії обчислення, що управляє, повинні проводитися достатньо швидко, щоб ситуація на об'єкті не встигла істотно змінитися.

- *Прийом сигналів від датчиків і передача дій, що управляють,* виконавчим пристроєм, здійснювані спеціалізованими платами вводу–вивода сигналів. Модулі УСО повинні мати високу швидкодію і добре узгоджуватися з іншими ТСА.

- *Захищеність від дії шкідливих техногенних чинників.* Кліматичні умови на металургійних об'єктах, як правило, вельми несприятливі для засобів обчислювальної техніки. Тому має бути забезпечена тривала і безвідмовна робота елементів УОК при температурах навколишнього повітря від мінус 5°C до плюс 70°C, вологості до 100% з можливою конденсацією, сильній запиленій, вібраціях і механічних ударах, а також в умовах дії могутніх електричних і магнітних полів.

- *Відповідність ергономічним нормам.* Наприклад, одне з правил ергономіки свідчить, що органи управління технологічними параметрами повинні розташовуватися на щиті управління нижче місця розміщення засобів вимірювання цих параметрів.

*Види сумісності* компонентів УОК забезпечуються наступними заходами:

- конструктивна – виготовленням уніфікованих функціональних блоків в приладового і модульного виконання;

- інформаційна – застосуванням стандартних сигналів і інтерфейсів;

- енергетична – узгодженням рівнів живлячої напруги і застосуванням уніфікованих блоків живлення;

- експлуатаційна – технічними вимогами до виробів, викладеними в нормативній документації;

- метрологічна – розробкою системних метрологічних характеристик і методів їх отримання.



### Рекомендована література

1. Глінков Г.М., Клімовіцкий М.Д. Теоретичні основи автоматичного управління металургійними процесами: Навчальний посібник для вузів – М.: Металургія, 1985. – 246 с.
2. Плетнев Г.П. Автоматичне управління і захист теплоенергетичних установок електростанцій – М.: Енергоатоміздат, 1986. – 344 с.
3. Автоматичне управління металургійними процесами: Підручник для вузів / Беленький А.М., Бердишев Б.Ф., Блінков О.М., Каганов В.Ю. – М.: Металургія, 1989. – 384 с.
4. Котів К.І., Шершевер М.А. Засоби вимірювання, контролю і автоматизації технологічних процесів, обчислювальна мікропроцесорна техніка. – М.: Металургія, 1989. – 496 с.
5. Щербіна Г.С. Основи теорії автоматичного управління. Частина 1. Лінійні АСУ: Конспект лекцій / Дніпропетровськ: Нметау, 2001. – 80 с.
6. Потап О.Е., Бейцун С.В., Лебедь в.В. Автоматизоване проектування управляючих інформаційних систем: Навчальний посібник. – Дніпропетровськ: Нметау, 2002. – 108 с.
7. Михайловський М.В., Бейцун С.В. Проектування автоматизованих систем управління тепловими процесами: Навчальний посібник. – Дніпропетровськ: Нметау, 2009. – 76 с.
8. Клюев А.С. Проектирование систем автоматизации технологических процессов. Справочное пособие. / Клюев А.С. Глазов Б.В. Дубровский А.Х. , Клюев А.А.. Под ред Клюева А.С. – 2 изд.- М.: Энергоатомиздат, 1990. - 464 с.

## Додатки

Таблиця П.1 – Номенклатура пускових пристроїв

№№ п/п	Найменування	Тип	Призначення, характеристика
1	Пускач магнітний реверсивний	ПМРТ-1	Контактний для управління трифазним асинхронним двигуном потужністю 0,27 кВт при напрузі 220/380 В
2	Пускач магнітний реверсивний	ПМРТ-2	То ж для двигуна потужністю 0,4.14,0 кВт
3	Магнітний підсилювач (пускач)	МУ-2Э	Безконтактний, для управління двофазним асинхронним двигуном. Вхідний опір 160 ом
4	Магнітний підсилювач (пускач)	МУ-2Б	То ж, вхідний опір 5 кОм
5	Магнітний підсилювач (пускач)	УМД	То ж
6	Підсилювач тиристора (пускач)	ПРБ-2	Безконтактний, для управління двофазним асинхронним двигуном. Вхідний опір 160 Ом
7	Підсилювач тиристора (пускач)	ПРБ-2М	То ж
8	Підсилювач тиристора	У-101	Безконтактний. для управління трифазним асинхронним двигуном з короткозамкнутим ротором
9	Підсилювач тиристора	У-23	То ж

Таблиця П.2 – Номенклатура регулюючих органів

Найменування	Тип	Умовний діаметр вхідного перетину Dy, мм
Заслінка малого опору	ЗМС	30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90
Поворотна регулююча заслінка	ПРЗ	100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 300, 350, 400, 450, 500
Дросель холодний	ДХ	50, 70, 80, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 600, 700, 800
Дросель холодний відсічною	ДХО	125, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 600, 700, 800
Дросельний клапан на підведення гарячого повітря	ДП	125, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450
Дросель гарячий	ДГ	125, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 550, 650, 750, 850
Клапан поворотний	КП	0,48; 0,56; 0,81; 1,04; 1,64; 1,95; 3,17; 4,17; 5,34; 6,45 Примітка: вказана номінальна величина прохідного перетину (у дм <sup>2</sup> )