

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ КОЛЕДЖ

Для спеціальності
5.151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
спеціалізації
5.151.1 Обслуговування інтелектуальних інтегрованих систем

Конспект лекцій
з навчальної дисципліни

СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ

Конспект лекцій з дисципліни «Системи автоматизованого управління» студентів спеціальності 5.151 Автоматизація та комп'ютерно – інтегровані технології спеціалізації 5.151. 1 Обслуговування інтелектуальних інтегрованих систем
/Укладач: Лихно О.В. – ХДПК, 2020. – 104 с.

Конспект лекцій розглянутий та рекомендований цикловою комісією
транспорту та електрозв'язку
(назва циклової комісії)

Протокол № 5 від “14” січня 2020 р.

Голова циклової комісії _____ (А.І.Руденко)
(підпис) прізвище та ініціали

Схвалено методичною радою Харківського державного політехнічного коледжу

Протокол № _____ від “_____” _____ 2020 р.

Голова методичної ради _____ (Р.М.Корольова)
(Підпис) прізвище та ініціали

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1.0 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕОРІЇ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.....	6
1.1 Основні поняття та класифікація автоматичних систем керування..	6
1.2 Опис функціональних елементів і систем автоматичного керування.....	9
1.2.1 Опис елементів в статичному режимі.....	10
1.2.2 Опис елементів в динамічному режимі.....	10
1.2.3 Перехідна функція.....	11
1.2.4 Передаточна функція.....	12
1.3 Типові динамічні ланки та їх характеристики.....	14
1.4 З'єднання лінійних ланок.....	23
1.5 Структурні схеми та їх перетворення.....	25
1.6 Передаточні функції систем автоматичного керування.....	26
1.7 Властивості об'єктів, що керуються.....	27
2.0 АНАЛІЗ АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ.....	31
2.1 Стійкість лінійних систем автоматичного керування.....	31
2.2 Критерії стійкості.....	32
2.2.1 Алгебраїчні критерії.....	32
2.2.2 Частотні критерії.....	34
2.3 Запаси стійкості.....	37
2.4 Якість роботи автоматичних систем керування.....	38
2.5 Підвищення точності та методи покращення якості автоматичного регулювання.....	42
2.5.1 Поняття про закони регулювання.....	42
2.5.2 Методи підвищення точності автоматичного регулювання.....	44
2.6 Аналіз нелінійних систем автоматичного керування.....	45
2.6.1 Загальні поняття нелінійних систем.....	45
2.6.2 Особливості досліджень нелінійних систем.....	48
3.0 ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ТА ЕЛЕМЕНТИ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ.....	54
3.1 Датчики.....	54
3.1.1 Неелектричні датчики.....	56
3.1.2 Електричні датчики.....	56
3.2 Пристрої задавання, порівняння та засоби відображення інформації.....	64
3.2.1 Пристрої задавання.....	64
3.2.2 Аналогово - цифрові перетворювачі.....	65
3.2.3 Цифро-аналоговий перетворювач.....	67
3.2.4 Засоби відображення інформації.....	68
3.3 Підсилювачі.....	69
3.4 Елементи та пристрої дискретної дії.....	73

3.4.1 Електромеханічні пристрої.....	73
3.4.2 Логічні пристрої (елементи).....	75
3.4.3 Принципи побудови схем.....	78
3.5 Виконавчі елементи систем автоматики.....	80
3.5.1 Електромагнітні виконавчі елементи (соленоїдні).....	81
3.5.2 Електродвигунні виконавчі елементи.....	82
3.5.3 Вибір виконавчих механізмів.....	83
4.0 АВТОМАТИЧНІ РЕГУЛЯТОРИ.....	83
4.1 Класифікація автоматичних регуляторів.....	83
4.2 Типові структури регуляторів.....	84
4.3 Вибір регуляторів.....	86
5.0 СИСТЕМИ ТЕЛЕМЕХАНІКИ.....	87
5.1 Будова систем телемеханіки.....	87
5.2 Види сигналів та їх кодування.....	89
5.3 Методи відокремлення та вибору сигналів.....	90
5.4 Канали зв'язку.....	91
5.5 Пристрої телемеханіки та їх принципи.....	91
6.0 НАДІЙНІСТЬ АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ.....	94
7.0 ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ.....	96
7.1 Загальні питання при розробці систем автоматики.....	96
7.1.1 Послідовність розробки систем автоматики.....	96
7.1.2 Схеми, що застосовуються в проектах технологічних процесів.....	96
7.2 Вибір технічних засобів автоматики.....	101
Література для детального вивчення курсу.....	104

ВСТУП

Метою навчальної дисципліни є формування у студентів здатностей:

- підбирати елементи для систем автоматичного керування з урахуванням конкретних умов їх експлуатації;
- аналізувати фізичні явища та процеси в системах автоматичного керування;
- виконувати синтез систем автоматичного керування;
- аналізувати якість систем автоматичного керування.

Основні завдання навчальної дисципліни. Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти після засвоєння навчальної дисципліни мають продемонструвати такі результати навчання, а саме

знання щодо:

- принципів організації систем автоматичного керування;
- методів аналізу та синтезу систем автоматичного керування;
- методам моделювання систем автоматичного керування;
- типових електромеханічних елементів та датчиків систем автоматичного керування.

уміння:

- оцінювати якість систем автоматичного керування на основі її математичної моделі та типових алгоритмів оцінки показників якості системи;
- створювати математичні моделі систем автоматичного керування, адекватні завданням;
- моделювати системи автоматичного керування із застосуванням сучасних комп'ютерних технологій;
- виконувати синтез простих систем, їх наладжувати та випробовувати.

Вивчення дисципліни дає можливість студенту виявити свої навички та здібності, закласти фундамент як для подальшого освоєння спеціальних дисциплін на старших курсах, так і майбутньої діяльності.

1.0 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕОРІЇ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

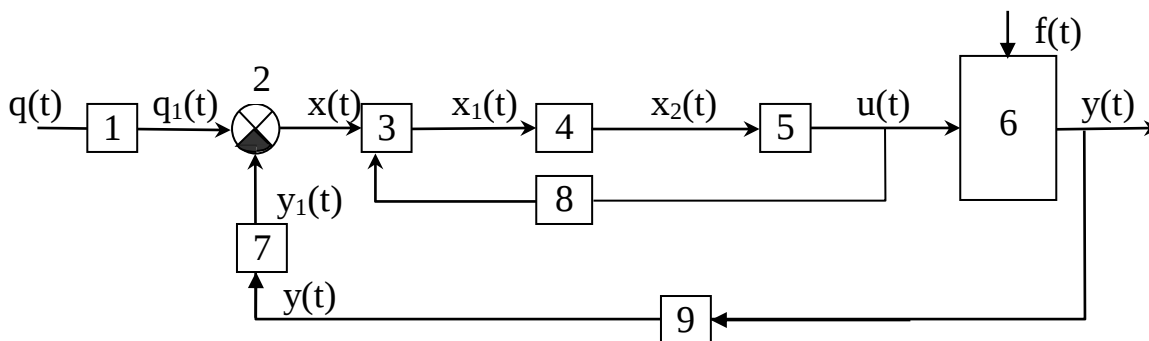
1.1 Основні поняття та класифікація автоматичних систем керування.

Автоматичне керування – сукупність дій, які вибрані із множини можливих і направлені на підтримання або покращення функціонування керованого об'єкта згідно мети його керування.

Автоматичне регулювання – це підтримання постійним або змінним за певним законом якоїсь вихідної величини, що характеризує процес.

Автоматичний контроль – це контроль різних параметрів, величин в об'єкті з метою встановити: чи не вийшли вони за межі допустимих значень.

Загальний випадок побудови системи автоматичного керування (САК):



1 – елемент-задатчик; 2 – елемент порівняння; 3 – перетворювач сигналу; 4 – підсилювач; 5 – виконавчий пристрій; 6 – об'єкт керування; 7 – чутливий елемент; 8 – місцевий зворотний зв'язок; 9 – головний зворотний зв'язок.

Елемент-задатчик – формує дію, яка задається $q(t)$ в величину $q_1(t)$, що дозволяє її порівняти з величиною, яка керується $y_1(t)$ (або перетворює сигнал величини, що керується).

Чутливий елемент – вимірює дійсне значення керованої величини $y(t)$ і перетворює її в величину $y_1(t)$ для порівняння з заданою $q_1(t)$.

Елемент порівняння – проводить вимірювання різниці сигналів $x(t) = q_1(t) - y_1(t)$.

Перетворювач сигналу – перетворює сигнал в придатний вигляд для подальшої обробки або використання.

Підсилювач – підсилює сигнал до величини $x_2(t)$, що дозволяє привести в дію виконавчий пристрій.

Виконавчий пристрій – виробляє та подає на регулюючий орган об'єкта керування дію $u(t)$.

Місцевий зворотний зв'язок (або корекція) – вводиться для поліпшення якісних параметрів керування.

Головний зворотний зв'язок – це зв'язок між виходом і входом системи.

Деякі елементи САК можуть бути об'єднані.

Алгоритм функціонування – сукупність правил або математичних залежностей, що визначають правильне виконання технологічного процесу. (Ці правила складаються на базі технологічних, економічних та інших вимог без врахування динамічного впливу автоматичних систем. В теорії автоматичного керування алгоритми функціонування вважаються заданими).

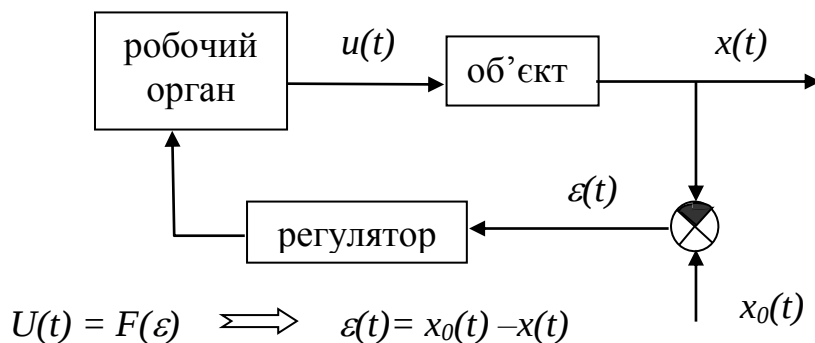
Алгоритм керування – сукупність команд, що визначають характер керуючих дій на об'єкт з метою здійснення ним заданого алгоритму функціонування з врахуванням властивостей системи.

В основі алгоритмів керування, що використовуються в техніці, лежать *три фундаментальні принципи*:

1. *Принцип розімкнутого керування* - керування здійснюється на основі заданого алгоритму функціонування і не контролюється за фактичним значенням величини, що керується:



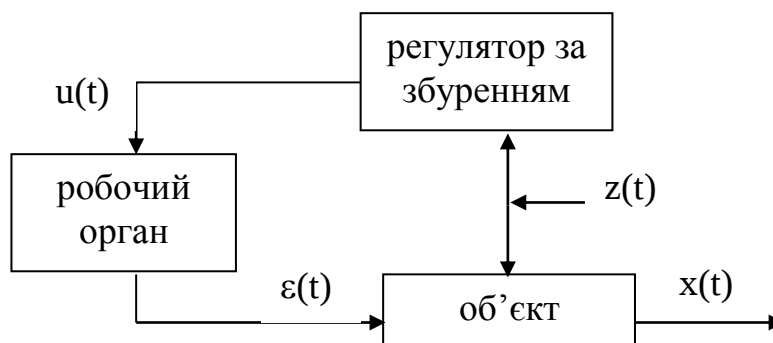
2. *Принцип керування за відхиленням* (принцип зворотнього зв'язку) – автоматичне керування:



F та ε повинні мати однаковий знак.

Регулятор створює головний зворотний зв'язок. (Принцип зворотного зв'язку – універсальний: діє в техніці, природі, суспільстві)

3. *Принцип регулювання за збуренням* (принцип компенсації):



$z(t)$ - збурення. $\varepsilon(t)=f(u,z)$.

Керування виробляється в функції збурення z так, щоб його дія на всю систему компенсувалась.

Система регулювання за збуренням в порівнянні з системами, що діють за відхиленням, відрізняються більшою стійкістю та швидкодією. До їх недоліків відносять складність вимірювання навантаження в великих системах, неповне врахування збурень (компенсуються тільки ті, що вимірюються). На практиці використовують комбінацію даних принципів.

Класифікація АСК.

1. За характером функціонування:

- стабілізуючі – алгоритм їх функціонування вимагає підтримувати значення керованої величини постійним – $y(t)=const$ – з допустимою похибкою;
- слідкуючи – призначена для зміни керованої величини $y(t)$ за законом, що заздалегідь невідомий (технологічна величина $q(t)$ може мати випадковий характер);
- програмні – призначені для зміни керованої величини за відомим законом у функції часу. Дані системи є системами відтворення з найбільшою точністю керуючої дії. Точність відтворення характеризується похибкою, що визначається як різниця між керуючою дією та величиною, що регулюється в даний момент часу.

2. За характером керування:

- з розімкнутим колом дії;
- з замкнутим колом дії (зворотний зв'язок).

3. За принципом пошуку:

- автоматичні системи керування – керуюча дія виникає як результат порівняння дійсного значення з заданим;
- автоматична система пошуку – керуюча дія є результатом аналізу пробних дій.

4. За керуючою дією на об'єкт:

- безперервні – безперервні зміни вхідної величини співвідноситься з змінами вихідної величини;
- дискретні – безперервні зміни вхідної величини викликають імпульсні, ступінчасті зміни вихідної величини (проходить квантування). Поділяються на:
 - імпульсні - квантується вхідний сигнал в часі, тобто вихідна величина являє собою послідовність імпульсів. Бувають:
 - амплітудноімпульсної модуляції;
 - широтно імпульсної модуляції;
 - частотно імпульсної модуляції.

- релейні системи вхідний сигнал квантується за рівнем;
 - цифрові (релейно-імпульсні) – вхідна величина постає в вигляді коду (0 та 1).
5. *За математичним поданням:*
- лінійні динаміка процесу описується лінійними рівняннями;
 - нелінійні – система, в яких хоча б в одній ланці порушується лінійність статичної характеристики.
6. *За характером передачі сигналів:*
- одно контурні – мають тільки один (головний) зворотній зв'язок;
 - багато контурні – один або декілька місцевих зворотних зв'язків.
7. *За кількістю параметрів, що керуються:*
- одномірні – одна керована величина;
 - багатомірні декілька керованих величин.
8. *За видом залежності між значеннями параметра, що керується та величини зовнішньої дії на об'єкт:*
- статичні – системи, що мають статизм, тобто всі зовнішні дії з часом стають постійними і призводять до сталої похибки. Залежність величини, що регулюються від навантаження в усталеному режимі називається характеристикою регулювання. Крутизна цієї характеристики вказує на нерівномірність або статизм регулювання. Статизм має постійну величину, якщо характеристика регулювання прямолінійна;
 - астатичні системи – системи, де статична похибка дорівнює нулю і не залежить від величини дії.
9. *За само пристосуванням* – параметри системи автоматично змінюються на основі інформації від об'єкта керування. Поділяються на:
- екстремальні – забезпечують виконання технологічної програми за максимальним або мінімальним значенням параметрів;
 - оптимальні – забезпечують роботу системи в оптимальному режимі (обмежені техніко-економічними умовами);
 - самоналагоджуючі – автоматично змінюються деякі параметри системи керування (коефіцієнт підсилення, коефіцієнт зворотного зв'язку);
 - сомоорганізуючі – вирішують задачу самоналагоджування шляхом зміни структури системи за не заданим заздалегідь способом.

1.2 Опис функціональних елементів і систем автоматичного керування.

Роботу АСК можна описати словами, але цей спосіб, хоча і дає зрозуміти принцип дії системи, не дозволяє отримати кількісну оцінку характеристики системи та отримати якісні показники регулювання.

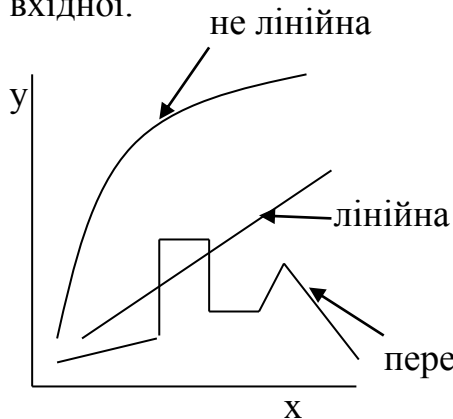
Робота будь-якої АСК пов'язана з дією на неї збурення, яке примушує систему переходити від одного усталеного режиму до іншого, виконуючи заданий закон регулювання.

Якщо збурюючи та керуючі дії в системі безперервно змінюються, то система знаходиться в *динамічному режимі* – режим, в якому основний стан системи є неусталеним. При цьому в системі виникають *перехідні процеси* – перехід від одного усталеного стану до іншого. Перехідний процес залежить від власних динамічних властивостей елементів системи та початкових умов.

У випадку, коли власний рух системи з часом затухає, вона приходить в усталений стан, який називається *статичним режимом*.

1.2.1 Опис елементів в статичному режимі

Статичний режим настає після перехідного процесу. Він аналізується за статичною характеристикою, що являє собою залежність вихідної величини від вхідної.



В практиці частіше зустрічаються нелінійні характеристики, що важко детермінуються. Вихід з цього є застосування методу *лінеаризації*. Найпростішим видом його є осереднення → в випадку незначних відхилень. В інших випадках аналітичну функцію розкладають в ряд Тейлора:

$$f(x) = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!} \Delta x + \frac{f''(x_0)}{2!} (\Delta x)^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!} (\Delta x)^n,$$

виключаючи вищі похідні з-за їх малого значення:

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0) \Delta x.$$

Відхилення лінеаризованої функції від дійсної складає

$$f(x) = f'(x_0) \Delta x. \text{ (або } \Delta y = \left(\frac{dy}{dx} \right)_{x_0} \Delta x \text{)}$$

$dy/dx = k$ – коефіцієнт передачі: він має назву

- для датчиків → коефіцієнт чутливості;
- для підсилювачів → коефіцієнт підсилення.

1.2.2 Опис елементів в динамічному режимі

Динамічний режим характеризується залежністю в часі вихідної (керованої) величини під впливом вхідних (керуючих) дій у неусталеному режимі. Динамічні властивості АСК та їх складових частин (ланок) математично описуються диференціальними рівняннями. Порядок складання диференціальних рівнянь полягає в наступному:

- визначають вхідні та вихідні величини та діючі на них фактори;
- вибирають початок відліку;
- виявляють і використовують основні фізичні закони, що визначають зв'язок між вхідними та вихідними величинами.

Загальний вигляд диференційного рівняння системи:

$$a_0 x_{\text{вих}} + a_1 \frac{dx_{\text{вих}}}{dt} + \dots + a_n \frac{d^n x_{\text{вих}}}{dt^n} = b_0 x_{\text{вх}} + b_1 \frac{dx_{\text{вх}}}{dt} + \dots + b_n \frac{d^n x_{\text{вх}}}{dt^n}$$

Рівняння можуть бути лінійними та нелінійними.

Для спрощення їх розв'язку, застосовують методи операційного числення, суть якого полягає в переході від змінних величин у функції часу $x(t)$ до змінних у функції деякого комплексного аргументу $x(p)$. $x(t)$ називається оригіналом, а $x(p)$ – зображенням.

$$x(p) = \int_0^{\infty} x(t) e^{-pt} dt$$

Цю залежність називають *перетворенням Лапласа*. Перехід від зображення до оригіналу називають *зворотнім перетворенням Лапласа*. На практиці символ d/dt замінюють оператором p , а операцію інтегрування – $1/p$. Для спеціальних функцій перехід від $x(t) \rightarrow x(p)$ і навпаки здійснюється за допомогою таблиць. Тоді диференційне рівняння прийме алгебраїчний вигляд:

$$y(t)(1 + a_1 p + \dots + a_n p^n) = x(t)(1 + b_1 p + \dots + b_n p^n).$$

Математична модель (рівняння) функціонального елемента називається *ланкою АСК*, тобто це така фізична або не фізична система $\varphi(x)$, яка перетворює вхідну величину $x(t)$, що змінюється в часі, в вихідну величину $y(t)$, що також змінюється в часі.

Ланка характеризується лінійністю та стаціонарністю.

Лінійність $y(t) = x(t)$ – лінійна залежність.

Стаціонарність – незалежність реакції ланки в часі від вхідної дії.

Елементарна ланка – описується рівнянням не вище другого порядку. (складні ланки - $n > 2$ – розбиваються на елементарні).

1.2.3 Перехідна функція

Для порівняння динамічних властивостей різних елементів системи, розгляд їх проводять в перехідному процесі при *нульових* початкових умовах і *типових* вхідних діях.

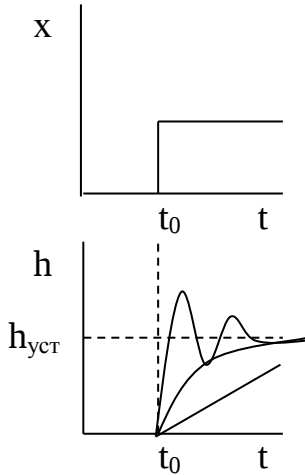
Під *початковими умовами* розуміють значення вихідної величини (і всіх її похідних) в момент $t=t_0$ при умові, що до цього часу зовнішня дія була відсутня.

В автоматичі використовують типові вхідні дії, що описуються ступінчастими, імпульсними та гармонійними функціями.

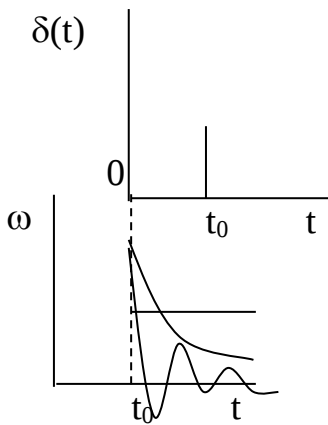
а) *ступінчаста* дія описується одиничною ступінчастою функцією

$$1(t) = \begin{cases} t & \text{при } t \geq 0 \\ 0 & \text{при } t \leq 0 \end{cases}$$

Реакція ланки на одиничну ступінчасту функцію називається *перехідною функцією* і позначається $h(t)$.



б) *імпульсна* перехідна функція – описується дельта-функцією Дірка, що є математичною ідеалізацією короткого імпульсу, площа якого дорівнює 1 при його нульовій довжині та нескінченній амплітуді:



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

$$\text{або } \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1$$

Реакція ланки на імпульсну функцію називається *ваговою функцією* - $\omega(t)$. Між перехідною та ваговою функціями існує зв'язок:

$$\omega(t) = dh(t)/dt \rightarrow h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \omega(t) dt.$$

Дані функції відносять до часових характеристик ланок. Описання ланок часовими характеристиками для систем високого порядку ускладнене, що є їх недоліком.

1.2.4 Передаточна функція

Передаточною функцією називається відношення лапласового зображення вихідної величини до лапласового зображення вхідної величини при нульових початкових умовах:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{P(p)}{Q(p)},$$

де $Q(p)$ – характеристичний многочлен ланки, а рівняння $Q(p)=0$ – називається характеристичним рівнянням.

Корені рівняння $Q(p)=0$ називаються полюсами передаточної функції.

Корені рівняння $P(p)=0$ називаються нулями передаточної функції.

Описання системи при прикладенні *гармонійної* вхідної дії – проводиться частотними характеристиками. При проходженні гармонійного сигналу через ланку, він викликає її реакцію, що в усталеному режимі також описується гармонійною функцією з тією ж частотою, але із зміненою амплітудою та фазою коливань по відношенню до вхідного збурення.

Амплітудночастотна характеристика (АЧХ) – відношення амплітуди вихідної величини до амплітуди вхідної величини в залежності від частоти:

$$A(\omega) = Y_{\max} / X_{\max}$$

Фазочастотна характеристика (ФЧХ) – різниця фаз коливань в залежності від частоти:

$$\varphi(\omega) = \varphi_2 - \varphi_1.$$

Амплітудно-фазова частотна характеристика (АФЧХ) – геометричне місце кінців векторів амплітуд передаточної функції при зміні частоти від нуля до нескінченності (*годограф*).

Частотні характеристики ланок залежить тільки від їх властивостей, але не залежить від амплітуди та фази вхідних гармонійних сигналів.

Для виявлення зв'язку характеристиками та диференціальним рівнянням ланки, вхідні та вихідні величини подаються в комплексній формі.

$$x(\omega) = A_{\text{вх}} e^{j\omega t}; y(\omega) = A_{\text{вих}} e^{j(\omega t + \varphi)}$$

Частотна перехідна функція:

$$W(j\omega) = \frac{y(\omega)}{x(\omega)} = \frac{A_{\text{вих}} e^{j(\omega t + \varphi)}}{A_{\text{вх}} e^{j\omega t}} = A e^{j\varphi}$$

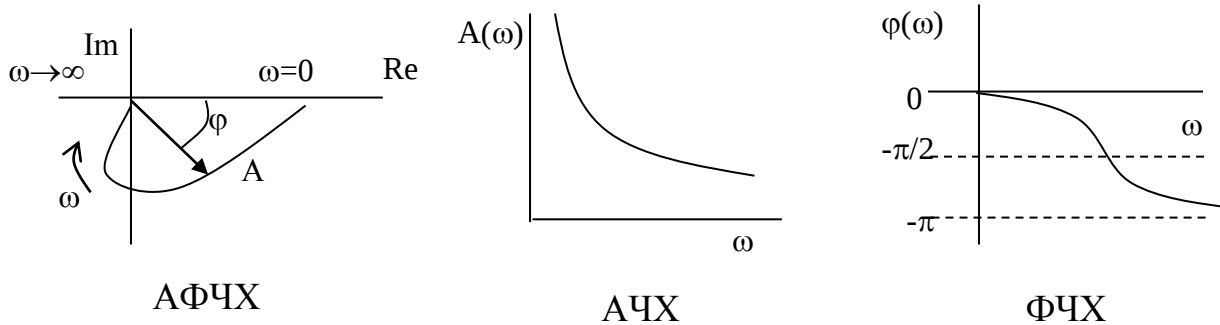
$$\text{або } W(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega)$$

Модуль частотної передаточної функції:

$$|A(\omega)| = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)}$$

Аргумент (кут зміщення):

$$\operatorname{tg} \varphi = Q(\omega)/P(\omega) \rightarrow \varphi = \operatorname{arctg}(Q(\omega)/P(\omega))$$



1.3 Типові динамічні ланки та їх характеристики

Розподіл АСК на елементи здійснюється не за функціональними чи конструктивними ознаками, а за їх динамічними властивостями, тобто розбиваються на *динамічні ланки*. Динамічна ланка – пристрій будь-якої фізичної природи, конструкції, але який описується диференціальним рівнянням певного виду.

За видом передаточної функції типові динамічні ланки поділяються на:

- позиційні;
- інтегруючі;
- диференціюючі.

а) **позиційні ланки** – ланки, в яких при усталеному режимі характерна лінійна залежність між вхідними та вихідними величинами.

1. **Безінерційна (ідеальна) ланка** – передача сигналу із входу на вихід проходить миттєво (сталою часу можна знехтувати). Ця ланка в статиці та динаміці описується рівнянням:

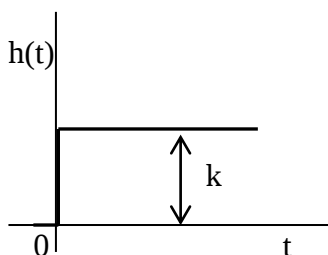
$$x_{вих} = kx_{вх}$$

Передаточна функція дорівнює сталій величині:

$$W(p) = W(j\omega) = k$$

(Приклад: редуктор (без врахування люфтів), подільник напруги, індукційний датчик).

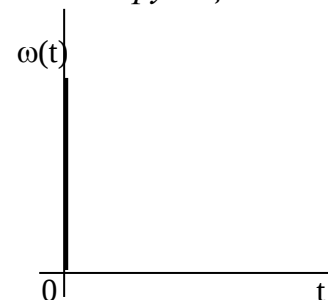
перехідна функція



$$x_2(t) = h(t) = k \cdot 1(t)$$

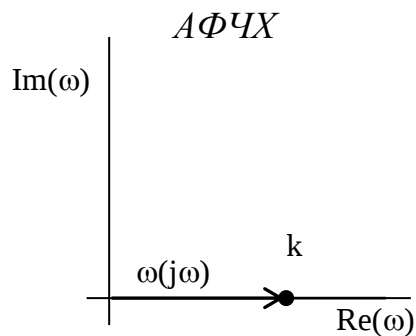
перехідна функція є ступінчатою функцією

вагова функція

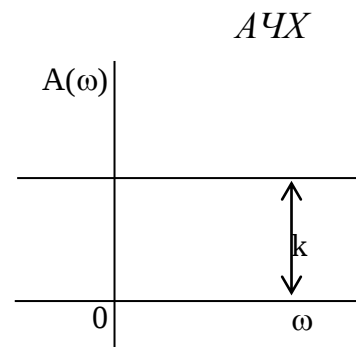


$$x_2(t) = \omega(t) = k \cdot \delta(t)$$

функція ваги є імпульсною функцією, площа якої дорівнює k



АФЧХ є точкою на відстані k від початку координат



$A(\omega) = k$
Модуль частотної передаточної функції є сталою величиною на всіх частотах.

Фазове зміщення дорівнює нулю ($\varphi = 0$).

2. Аперіодична (інерційна) ланка першого порядку – описується диференціальним рівнянням першого порядку:

$$T \frac{dx_{\text{вux}}}{dt} + x_{\text{вux}} = kx_{\text{вх}} \quad (\text{або } (Tp + 1)x_{\text{вux}} = kx_{\text{вх}})$$

Передаточна функція:

$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1}$$

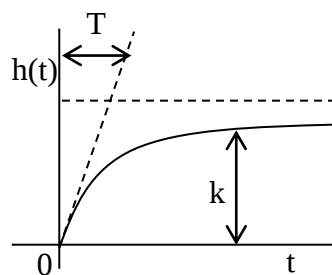
(Приклад: двигун будь-якого типу (електричний, пневматичний, гідравлічний), резервуар з газом, електропіч)

При гармонійному сигналі:

$$W(j\omega) = \frac{k}{Tj\omega + 1} = \frac{k}{\sqrt{T^2\omega^2 + 1}} e^{-j \arctg T\omega}$$

Модуль $A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{T^2\omega^2 + 1}}$. Фазове зміщення $\varphi = -\arctg T\omega$

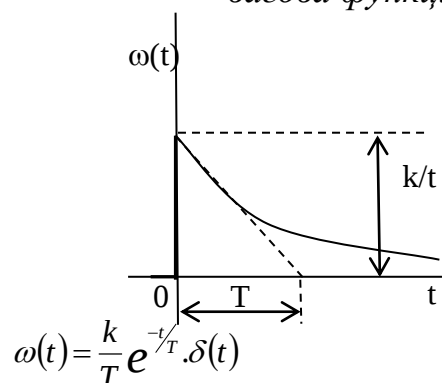
перехідна функція



$$h(t) = k \left(1 - e^{-t/T} \right) \cdot 1(t)$$

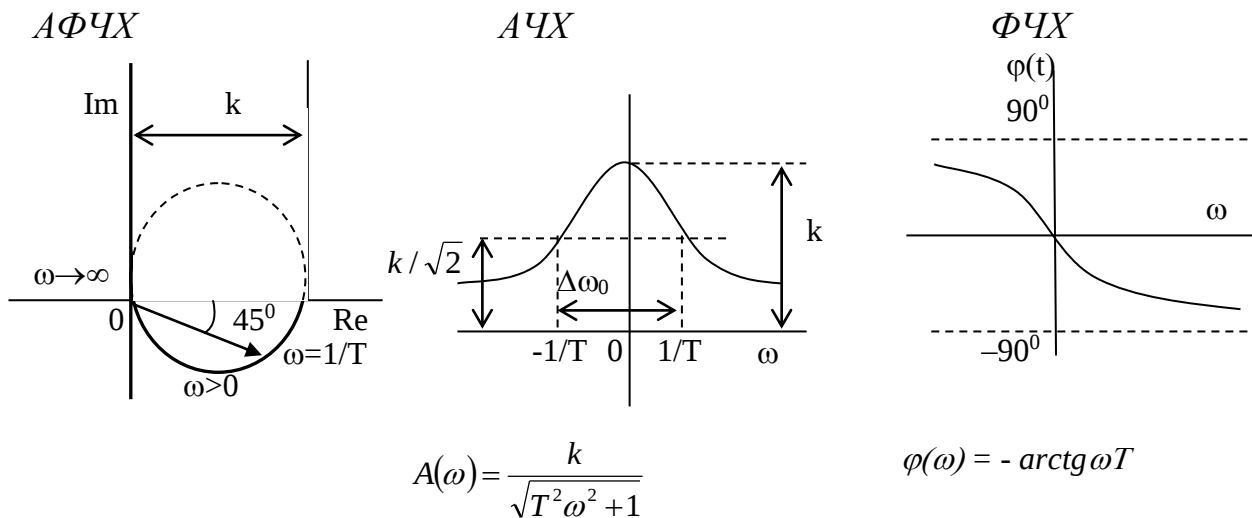
$1(t)$ вказує, що експонента починається з моменту $t=0$
 T – стала часу. Чим T більше, тим повільніше проходить встановлення значення $x_2 = kx_1$.
Практично перехідний процес закінчується при $t=3T$ (рідше при $(4 \dots 5)T$)

вагова функція



$$\omega(t) = \frac{k}{T} e^{-t/T} \cdot \delta(t)$$

знаходиться диференціюванням перехідної функції



При зростанні ω підсилення A падає ти швидше, чим більша стала часу T (інерційність ланки)

При низьких частотах ($\omega < 1/T$) A коливань наближається до k . Чим менша T , тим ширша смуга пропускання частот $\Delta\omega$

3. Аперіодична ланка другого порядку. Диференційне рівняння має вигляд:

$$T_2^2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + T_1 \frac{dx_2}{dt} + x_2 = kx_1$$

(або $(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)x_2 = kx_1$) при умові, що корені характеристичного рівняння $T_2^2 p^2 + T_1 p + 1 = 0$ дійсні. Це виконується тоді, коли $T_1 \geq 2T_2$. Фізичний зміст цієї умови полягає в тому, що втрати енергії в ланці великі і коливання в ній не виникають.

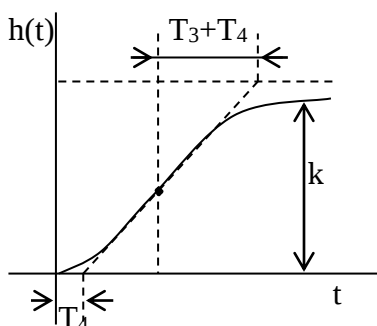
Аперіодична ланка другого порядку еквівалентна послідовно з'єднаних аперіодичних ланок першого порядку з загальник коефіцієнтом передачі k .

Передаточна функція:

$$W(p) = \frac{k}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1} \quad \text{або} \quad W(p) = \frac{k}{(1 + T_3 p)(1 + T_4 p)}$$

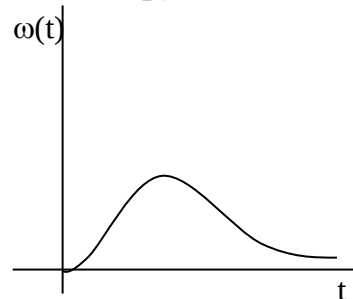
$$\text{де } T_{3,4} = \frac{T_1}{2} \pm \sqrt{\frac{T_1^2}{4} - T_2^2} \quad (T_1 > 2T_2; T_3 > T_4)$$

перехідна функція

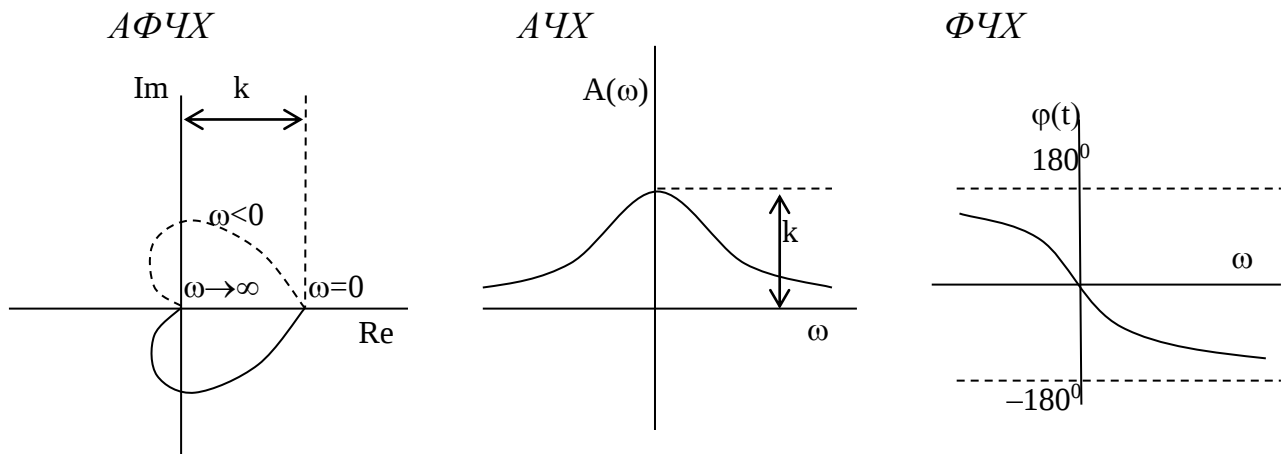


$$h(t) = k \left(1 - \frac{T_3}{T_3 - T_4} e^{-t/T_3} + \frac{T_4}{T_3 - T_4} e^{-t/T_4} \right) \cdot 1(t)$$

вагова функція



$$w(t) = \frac{k}{T_3 - T_4} \left(e^{-t/T_3} - e^{-t/T_4} \right) \cdot \delta(t)$$



$$A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{1 + \omega^2 T_3^2} \sqrt{1 + \omega^2 T_4^2}} \quad \varphi(\omega) = -\arctg \omega T_3 - \arctg \omega T_4$$

4. Коливальна ланка – описується таким же рівнянням, як і для аперіодичної ланки другого порядку, але корені характеристичного рівняння повинні бути комплексними, що виконується при умові $T_1 < 2T_2$.

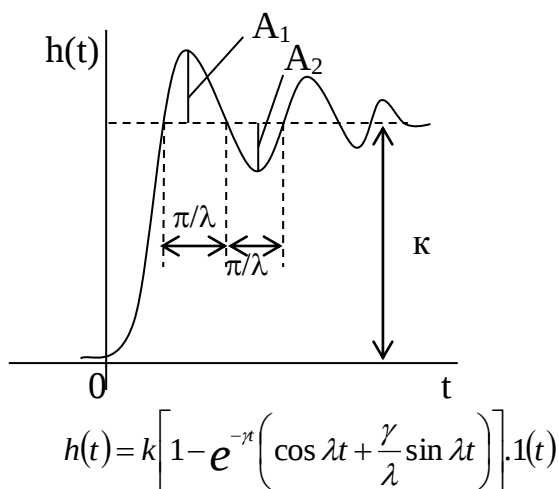
Передаточна функція:

$$W(p) = \frac{k}{1 + 2p\xi T_1 + p^2 T_2^2}$$

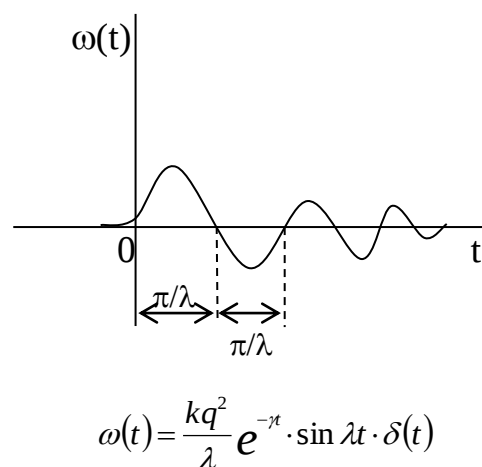
де ξ - параметр затухання ($0 < \xi < 1$)

(Приклад: RLC-ланцюг)

перехідна функція



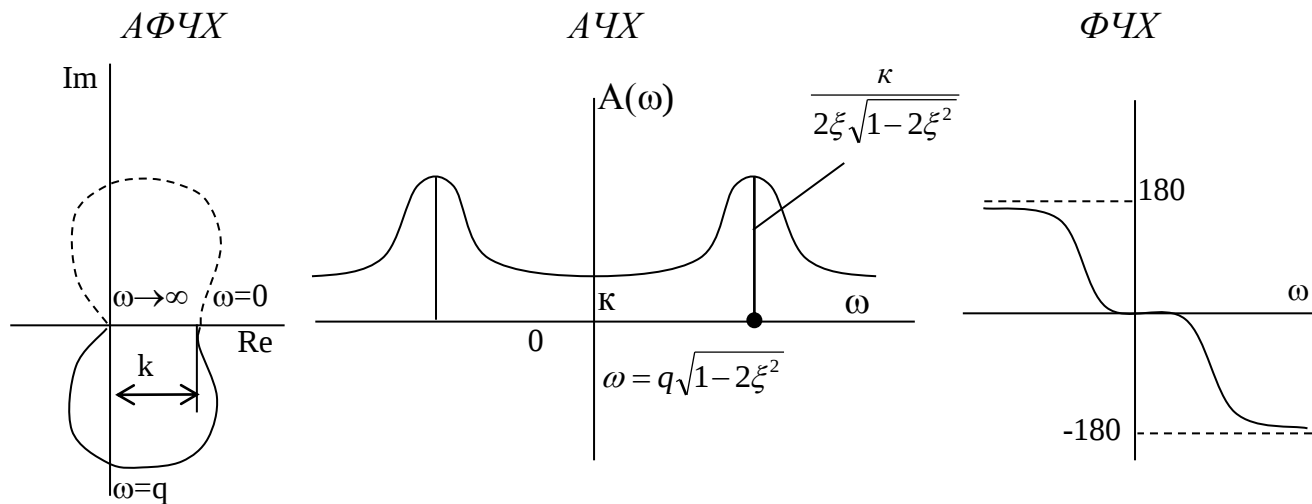
вагова функція



$\gamma = \xi q$ (q- кутова частота)

$\lambda = q \sqrt{1 - \xi^2}$ - частота

затухання коливань.



$$A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{(1-\omega^2 T^2)^2 + 4\xi^2 \omega^2 T^2}} \quad \varphi(\omega) = -\arctg \frac{2\xi \omega T}{1-\omega^2 T^2}$$

має резонансний пік
при $\xi < 0,707$

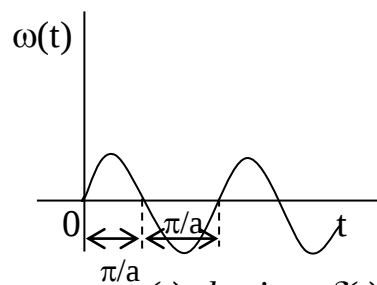
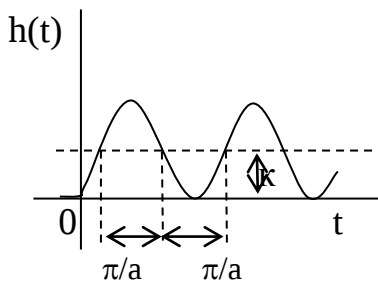
5. Консервативна ланка – є окремим випадком коливальної ланки, в якій відсутній елемент, що поглинає енергію коливань ($\xi=0$).

Передаточна функція:

$$W(p) = \frac{k}{1+T^2 p^2} \quad (\text{або } W(j\omega) = \frac{k}{1-T^2 \omega^2})$$

(Приклад: LC-ланцюг)
перехідна функція

вагова функція



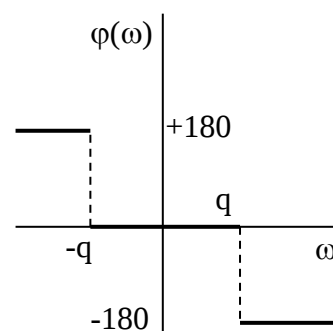
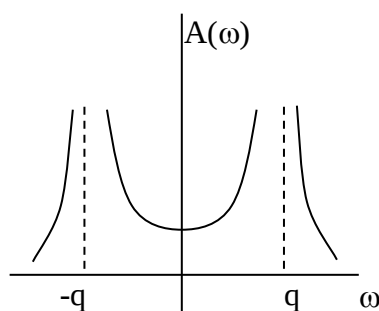
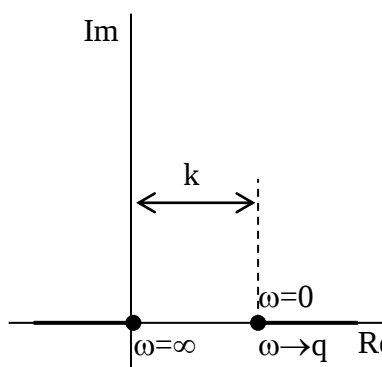
$$h(t) = k(1 - \cos qt) \cdot 1(t)$$

$$w(t) = kq \sin qt \cdot \delta(t)$$

АФЧХ

АЧХ

ФЧХ



$$A(\omega) = \frac{k}{|1 - \omega^2 T^2|}$$

$$\begin{aligned} \varphi &= 0^\circ & -q < \omega < q \\ \varphi &= -180^\circ & \omega > q \\ \varphi &= -180^\circ & \omega < -q \end{aligned}$$

б) інтегруючі ланки

1. Ідеальна інтегруюча ланка – пристрої, в яких швидкість зміни вихідної величини пропорційна вхідній, тобто при незмінних значеннях вхідної, вихідна величина може необмежено зростати або знижуватися (їх ще називають астатичними або нейтральними).

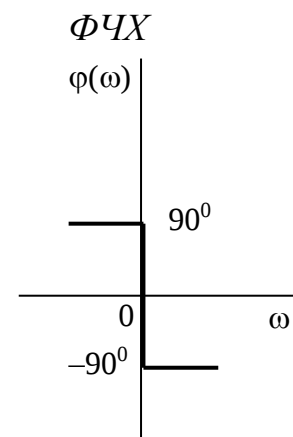
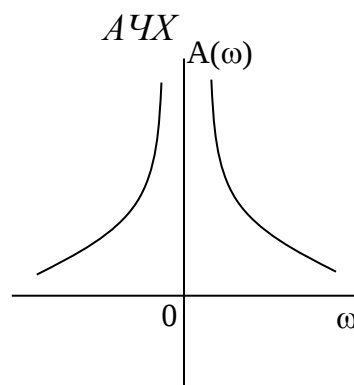
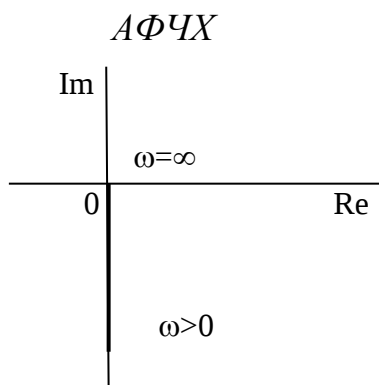
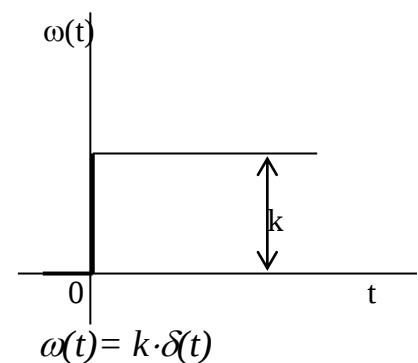
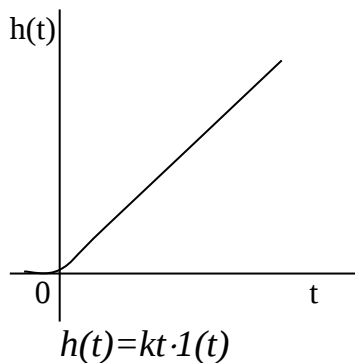
Диференціальне рівняння:

$$\frac{dx_2}{dt} = kx_1$$

Передаточна функція:

$$W(p) = \frac{k}{p}$$

(Приклад: операційний підсилювач в режимі інтегрування, гідравлічний демпфер)
перехідна функція вагова функція



при $\omega = 0$ $A \rightarrow \infty$
при $\omega \rightarrow \infty$ $A \rightarrow 0$

2. Інтегруюча ланка з затримкою.

Диференціальне рівняння:

$$T \frac{d^2 x_2}{dt^2} + \frac{dx_2}{dt} = kx_1$$

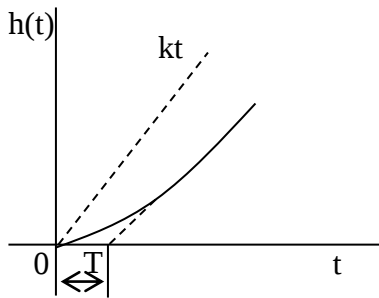
Передаточна функція:

$$W(p) = \frac{k}{p(1+Tp)}$$

Цю ланку можна уявити як сукупність послідовно ввімкнутих ланок – ідеальної інтегруючої та аперіодичної першого порядку:

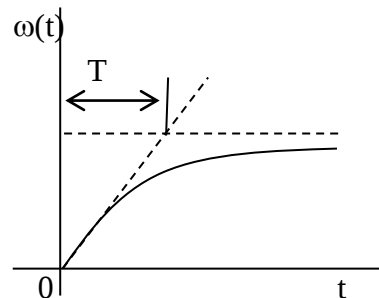
$$W(p) = \frac{k}{p} - \frac{kT}{1+Tp}$$

перехідна функція



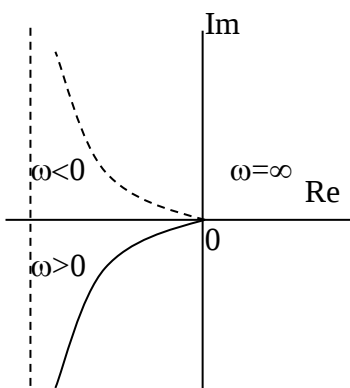
$$h(t) = k[t - T(1 - e^{-t/T})] \cdot 1(t)$$

вагова функція

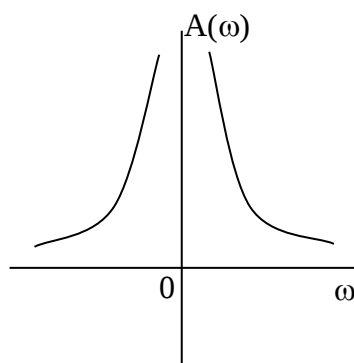


$$w(t) = k(1 - e^{-t/T}) \cdot \delta(t)$$

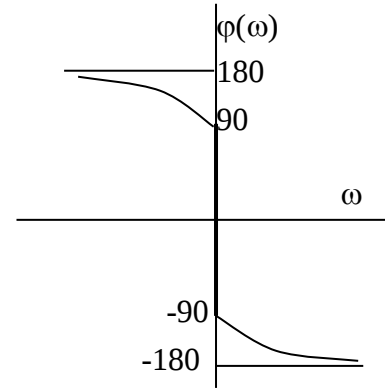
АФЧХ



АЧХ



ФЧХ



3. Ізодромна ланка.

Диференціальне рівняння:

$$\frac{dx_2}{dx} = kx_1 + k_1 \frac{dx_1}{dt}$$

Передаточна функція:

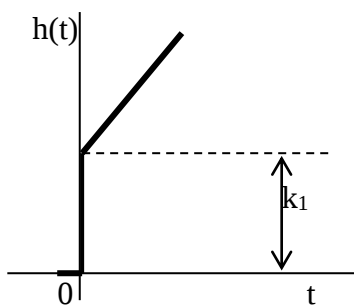
$$W(p) = \frac{k}{p} + k_1 = \frac{k(1+Tp)}{p}$$

де $T = k_1/k$

Ланку можна уявити як сукупність двох ланок, що діють паралельно – ідеально інтегруюча та безінерційна.

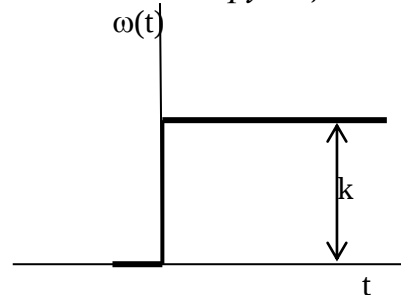
(Приклад: гідравлічний демпфер з пружиною)

перехідна функція

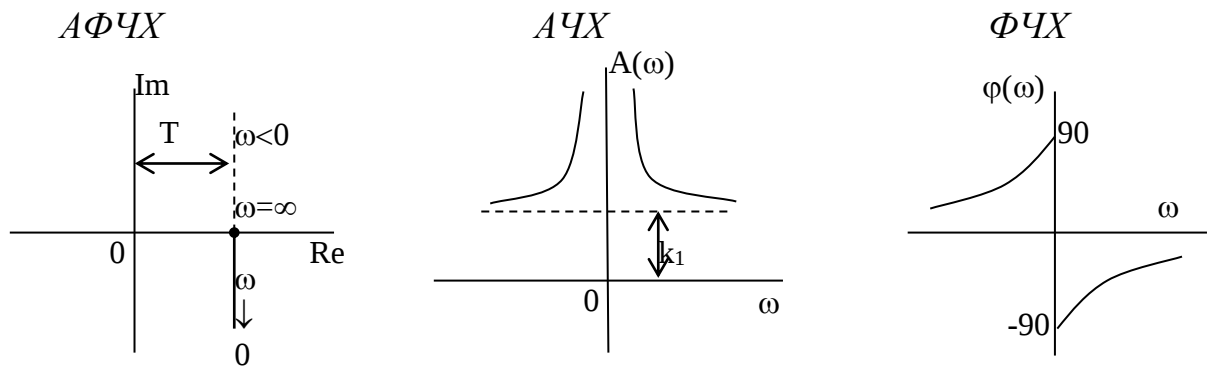


$$h(t) = (kt + k_1) \cdot 1(t)$$

вагова функція



$$w(t) = k \cdot 1(t) + k_1 \cdot \delta(t)$$



Дана ланка має властивості вводити інтегруючу дію в області малих частот, що покращує якісні показники систем автоматичного регулювання.

в) диференціююча ланки

1. Ідеальна диференціююча ланка

Диференційне рівняння:

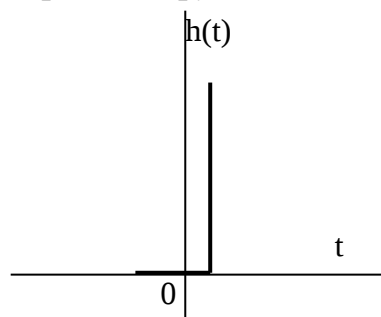
$$x_2 = k \frac{dx_1}{dt}$$

Передаточна функція:

$$W(p) = kp$$

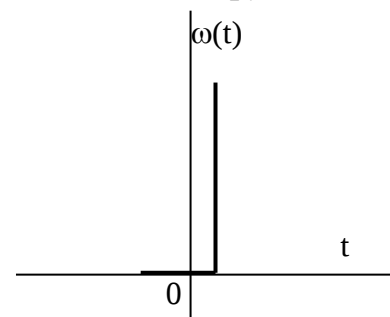
(Приклад: тахогенератор, операційний підсилювач в режимі диференціювання)

перехідна функція



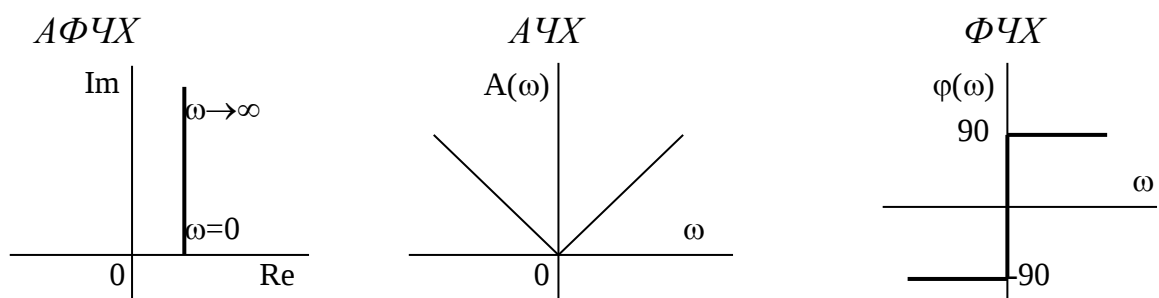
$$h(t) = k \cdot \delta(t)$$

вагова функція



$$w(t) = k \frac{d\delta(t)}{dt}$$

При $t=0$ буде миттєвий стрибок від 0 до ∞ і знову повернення до 0



Диференціююча ланка найкраще пропускає високочастотні коливання вхідної величини. Всі її характеристики протилежні характеристикам інтегруючої ланки.

2. Диференціююча ланка з затримкою (реальна диференціююча ланка)

Диференційне рівняння:

$$T \frac{dx_2}{dt} + x_2 = k \frac{dx_1}{dt}$$

Передаточна функція:

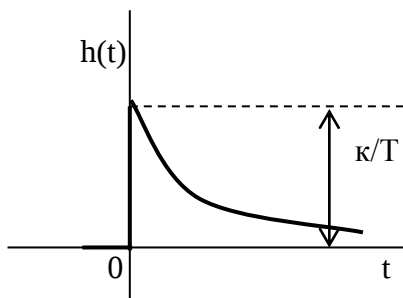
$$W(p) = \frac{kp}{1+Tp} \quad \text{або} \quad W(j\omega) = \frac{kj\omega}{Tj\omega+1} = \frac{j\omega k + \omega^2 kT}{1 + \omega^2 T^2}$$

Модуль $A(\omega) = \frac{\omega k}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}$. Кут зсуву $\varphi = \arctg \frac{1}{T\omega}$

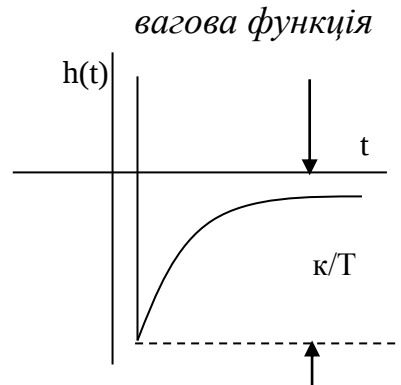
Ланку можна уявити як дві ввімкнуті послідовно ланки – ідеально диференціюючу та аперіодичну першого порядку.

(Приклад: RC-ланцюг, трансформатор)

перехідна функція

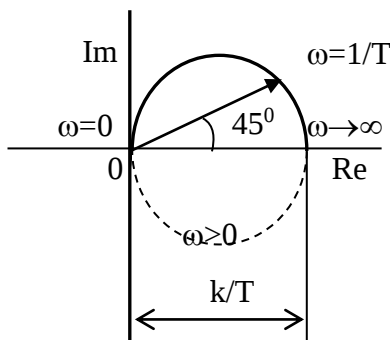


$$h(t) = \frac{k}{T} e^{-t/T} \cdot 1(t)$$

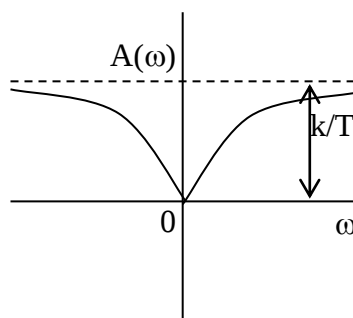


$$\omega(t) = \frac{k}{T} \cdot \delta(t) - \frac{k}{T^2} e^{-t/T} \cdot 1(t)$$

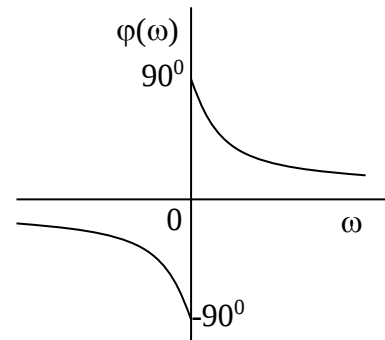
АФЧХ



АЧХ



ФЧХ



В області високих частот реальна ланка пропускає сигнал гірше ніж ідеальна

Фазове зміщення є найбільшим при низьких частотах. На високих частотах кут зменшується і наближається до 0 при $\omega \rightarrow \infty$

г) **трансцендентні ланки** – описується неалгебраїчними передаточними функціями. До них відносять ланки чистого запізнення.

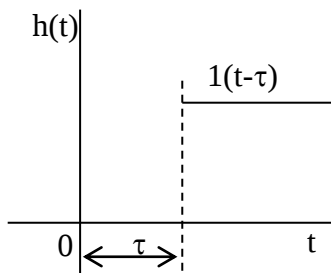
(Приклад: живильник з транспортером, магнітний запис та відтворення сигналів, електроланцюг з розподіленими параметрами)

$$x_2(t) = x_1(t - \tau) \quad \tau > 0$$

Передаточна функція:

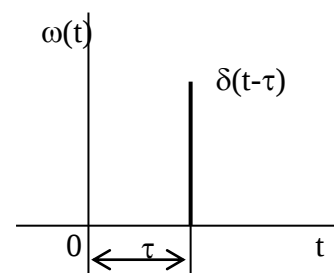
$$W(p) = e^{-p\tau} \cdot x(t) \quad \text{або} \quad W(j\omega) = \cos \omega\tau - j \sin \omega\tau$$

перехідна функція



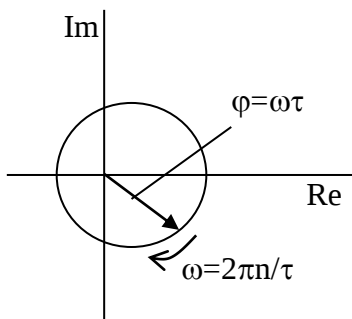
$$h(t) = 1 \cdot (t - \tau)$$

вагова функція

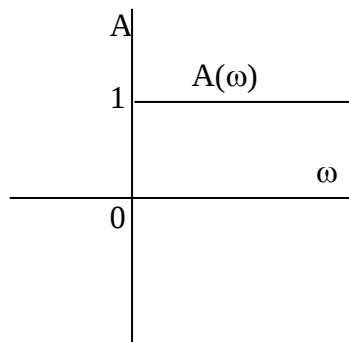


$$\omega(t) = \delta(t - \tau)$$

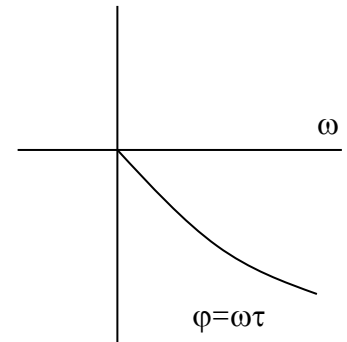
АФЧХ



АЧХ



ФЧХ



Коло одиничного вектора. Ланка відтворює коливання будь-якої частоти без викривлення, але з відставанням за фазою, яке залежить від частоти.

$$A(\omega) = 1$$

$$\phi(\omega) = -\omega T$$

1.4 З'єднання лінійних ланок

Реальні системи автоматичного регулювання є сукупність з'єднаних елементарних ланок. Існує три типи з'єднань: *послідовне, паралельне та паралельно-зустрічне* (або з'єднання з зворотним зв'язком).

а) *послідовне з'єднання ланок.*

При такому з'єднанні вихідна величина попередньої ланки є вхідною величиною наступної:

$$y_n = \prod_{i=1}^n k_i x_i$$

(де k_i – коефіцієнт передачі з'єднання ланок), тобто статична характеристика є лінія з кутом нахилу $\alpha = \arctg k$.

Передаточна функція:

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

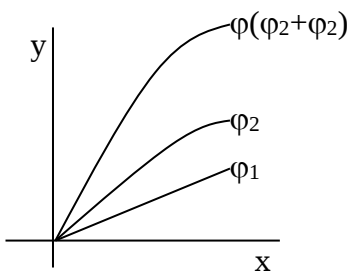
Частотна передаточна функція:

$$W(j\omega)_n = e^{j \sum_{i=1}^n \varphi_i(\omega)} \prod_{i=1}^n A_i(\omega)$$

Звідси витікає, що загальна АЧХ знаходиться в результаті множення ($A(\omega) = \prod_{i=1}^n A_i(\omega)$), ФЧХ – додавання ($\varphi(\omega) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(\omega)$).

б) *паралельне з'єднання ланок.*

При такому з'єднанні вхідна величина для всіх ланок одна, а їх вихідні величини додаються.



Перехідна функція паралельного з'єднання:

$$h(t) = \sum_{i=1}^n h_i(t)$$

Передаточна функція з'єднання:

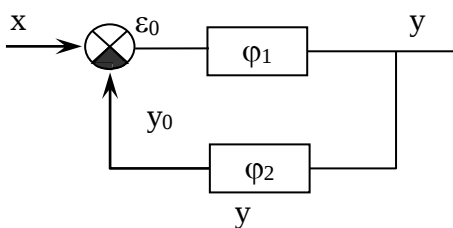
$$W(p) = \sum_{i=1}^n W_i(p)$$

Частотна передаточна функція:

$$W(j\omega) = \sum_{i=1}^n W_i(j\omega) \rightarrow \begin{cases} A(\omega) = \sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2} \\ \varphi(\omega) = \arctg \frac{\text{Im}}{\text{Re}} \end{cases}$$

в) *паралельно-зустрічне з'єднання ланок.*

При такому з'єднанні вихідна величина одної ланки подається зворотно на його вхід через іншу ланку. В автоматичних пристроях застосовують, в основному, від'ємний зворотний зв'язок, при якому на вхід в прямому ланцюгу подається різниця від вхідної величини x та вихідної величини y_0 ланки зворотного зв'язку φ_2 .



В статичному режимі таке з'єднання описується рівняннями:

$$\begin{cases} y = \varphi_1 \varepsilon = \varphi_1(x - y_0) \\ y = \varphi_2 y \end{cases}$$

Звідки

$$y = \frac{\varphi_1}{1 \pm \varphi_1 \varphi_2}$$

Передаточна функція ланки має вигляд:

$$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 \pm W_1(p)W_2(p)}$$

(де знак „+” відноситься до від'ємного зворотного зв'язку).

Частотна передаточна функція:

$$W(j\omega) = \frac{W_1(j\omega)}{1 \pm W_1(j\omega)W_2(j\omega)}$$

Для побудови АФЧХ таких ланок простих аналітичних виразів немає. Їх будують за спеціальними номограмами.

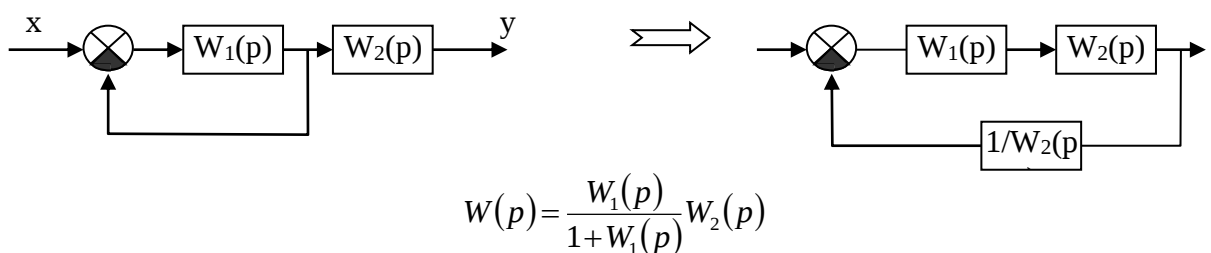
1.5 Структурні схеми та їх перетворення

Структурні схеми автоматичних систем регулювання або керування називаються такі схеми, в яких функціональні елементи подані типовими динамічними ланками. Вони використовуються для теоретичного дослідження автоматичних систем керування. Динамічні ланки подаються своїми передаточними функціями.

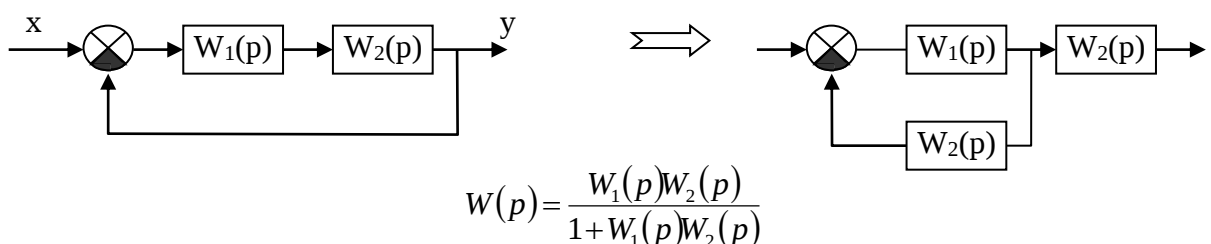
Найчастіше зустрічаються наступні перетворення схем:

1. Перенос вузла зла через ланку.

а) *в напрямку розповсюдження дії:*

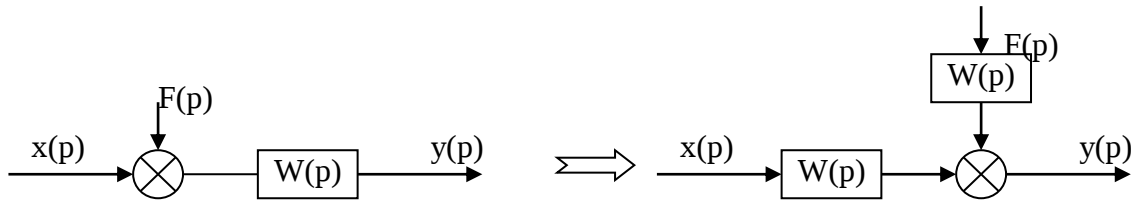


б) *проти напрямку розповсюдження дії:*



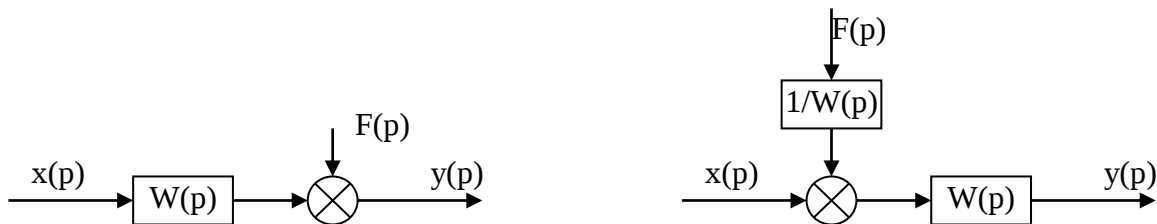
2. Перенос суматора через ланку:

а) в напрямку розповсюдження дії:



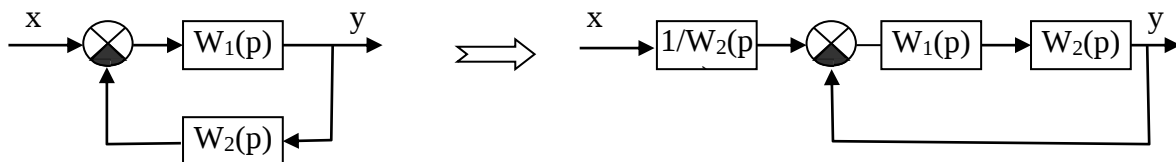
$$y(p) = [x(p) + F(p)] W(p) \quad \rightarrow \quad y(p) = x(p) W(p) + F(p) W(p)$$

б) проти напрямку розповсюдження дії:



$$y(p) = x(p) W(p) + F(p) \quad \rightarrow \quad y(p) = [x(p) + F(p)/W(p)] W(p)$$

4. Заміна з'єднання з неодиначним зворотним зв'язком еквівалентним з'єднанням з одиничним зворотним зв'язком

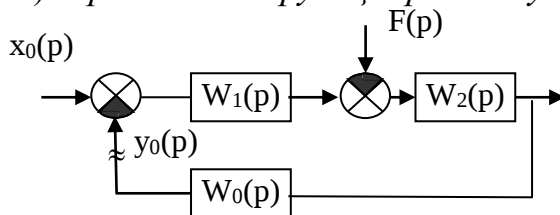


$$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 + W_1(p)W_2(p)} \quad \rightarrow \quad W(p) = \frac{1}{W_2(p)} \cdot \frac{W_1(p)W_2(p)}{1 + W_1(p)W_2(p)}$$

1.6 Передаючі функції систем автоматичного керування

Для інженерних розрахунків використовують передаючі функції розімкненої системи та передаючі функції замкнутої системи відносно дії, що задає та збуджує.

а) *передаюча функція розімкненої системи.*



Контур регулювання передбачається бути розімкнутим біля елемента порівняння (хвиляста лінія).

Передаюча функція в даному випадку:

$$W(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_0(p)$$

б) *передаточна функція замкнутої системи відносно дії, що задає сигнал.*

В цьому випадку зовнішні дії відсутні ($f(t)=0$). Тоді передаточна функція:

$$W_x(p) = \frac{W_1(p)W_2(p)}{1+W_1(p)W_2(p)W_0(p)} = \frac{W_1(p)W_2(p)}{1+W(p)}$$

в) *передаточна функція замкнутої системи відносно дії, що збурює (тобто $x_0(t)=0$).*

Тоді передаточна функція:

$$W_f(p) = \frac{W_1(p)}{1+W_1(p)W_2(p)W_0(p)} = \frac{W_1(p)}{1+W(p)} -$$

вона показує вплив $f(t)$ на вихідну величину, що керується $y(t)$. За даним виразом можлива оцінка зниження точності регулювання: чим $W_f(p)$ наближається до нуля, тим менше вплив збурюючої дії.

1.7 Властивості об'єктів, що керуються.

Об'єкт, що керується, є тим елементом системи автоматичного регулювання, де здійснюється заданий алгоритм функціонування. Цим об'єктом може бути технологічна машина, що виготовляє кінцеву продукцію (або напівфабрикат). До об'єкта може долучатися енергія зовнішнього середовища, якщо вона суттєво впливає на енергетичний стан об'єкта.

(Приклад: опалювальна система: її стан залежить від t^0 навколишнього середовища)

Ознаки технічних пристроїв і процесів, які належать до класу об'єктів, що керуються:

- в них проходить перетворення, передача або накопичення енергії або речовини;
- вони мають регулюючий орган для зміни кількості енергії або речовини, що надходить до об'єкту;
- приплив енергії або речовини змінює стан об'єкту, який характеризується зміною одного або декілька параметрів, що визначають алгоритм функціонування об'єкту та складають мету керування. Ці параметри характеризують якісні показники процесу. Їх називають змінними керування або вихідними величинами, що керуються.

Дія на об'єкт може бути прикладена як з боку надходження енергії або речовини, так і на виході.

Дія на об'єкт може бути *керуючою* та *збурюючою*. *Керуюча* дія породжує операції керування, що наближають процес до заданого режиму роботи. *Збурююча* дія, навпаки, віддаляє процес від заданого значення показників режиму та намагається вивести об'єкт від усталеного стану. Збурюючи дія, як

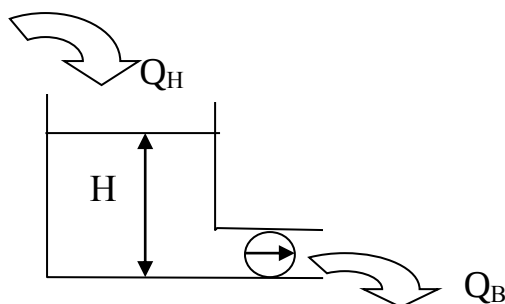
правило, є випадковою величиною, що породжується навантаженням (інколи внутрішніми причинами).

Об'єкт, що керується має певні властивості, які впливають на показники керування. До них відносять:

- самовирівнювання;
- запізнення реакції об'єкту на дію.

Під *самовирівнюванням* розуміють властивість об'єкту самостійно надходити в новий стан рівноваги при зміні керуючої або збурюючої дії.

Розглянемо це поняття на прикладах.



Q_n – кількість води, що надходить і регулюється вентилем;

Q_v – витрати води;

H – рівень води (вихідна величина);

S – площа поверхні води в резервуарі.

1. При $Q_v = Q_n$ $H = \text{const}$.

2. При $Q_v < Q_n \rightarrow \Delta Q = Q_n - Q_v$

$$V_0 + \Delta Q \Delta t = S(H_0 + \Delta H)$$

$$\Delta Q \Delta t = S \Delta H$$

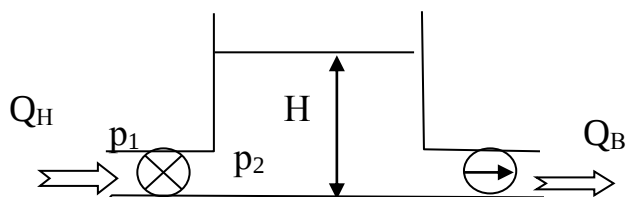
при $\Delta t \rightarrow 0$:

$$S \frac{dH}{dt} = Q_n - Q_v$$

Швидкість зміни рівня пропорційна $1/S$ при $\Delta Q \neq 0 = \text{const}$.

Це інтегруюча ланка, яка характеризується безперервною зміною в часі вихідної величини при наявності вхідної дії, тобто при $t \rightarrow \infty$ об'єкт не прийде до рівноваги (при якому $H = \text{const}$). Об'єкт не має властивості *самовирівнювання*, він є *астатичним*. В цьому випадку вихідна величина не впливає на керуючу або збурюючу дію.

При певному значенні H настає момент, коли $p_2 = p_1$ ($p = \rho g H$) і надходження води припиняється. Об'єкт сам встановлює рівень H , тобто він має властивість *самовирівнювання* або називається *статичним*.



Рівняння об'єкту:

$$S \frac{dH_0}{dt} = Q_{H0} - Q_{E0}$$

Новий стан виникне при зміні або витрат, або надходження води:

$$S \frac{d(H_0 + \Delta H)}{dt} = Q_H - Q_E + \Delta Q$$

так як Q_{H0} та Q_{E0} є функціями нелінійними (найчастіше), то лінеаризацію проведемо за допомогою розкладання в ряд Тейлора, що приведе до системи рівнянь:

$$\begin{cases} Q_H(H) \approx Q_{H0} + \left(\frac{dQ_H}{dH} \right)_0 \Delta H + \Delta Q \\ Q_E(H) \approx Q_{E0} + \left(\frac{dQ_E}{dH} \right)_0 \Delta H \end{cases}$$

Тоді рівняння об'єкту прийме вигляд:

$$S \frac{d\Delta H}{dt} + \left[\left(\frac{dQ_E}{dH} \right)_0 - \left(\frac{dQ_H}{dH} \right)_0 \right] \Delta H = \Delta Q$$

Якщо ввести відносні величини:

$$\varphi = \frac{\Delta H}{H_0} \text{ та } \mu = \frac{\Delta Q}{Q_0}$$

отримаємо

$$S \frac{H_0}{Q_0} \frac{d\varphi}{dt} + \frac{H_0}{Q_0} \left[\left(\frac{dQ_E}{dH} \right)_0 - \left(\frac{dQ_H}{dH} \right)_0 \right] \varphi = \mu$$

або

$$T \frac{d\varphi}{dt} \pm \xi \varphi = \mu$$

(рівняння Стодоли – рівняння аперіодичної ланки першого порядку)

де ξ - коефіцієнт самовирівнювання:

при $\xi > 0$ – стійкий статичний об'єкт;

$\xi < 0$ – не стійкий;

$\xi = 0$ – астатичний.

Об'єкти з від'ємним самовирівнюванням або без самовирівнювання не можуть працювати без автоматичного регулятора.

Для об'єктів з самовирівнюванням характерна наявність внутрішнього зворотного зв'язку. Якщо він від'ємний, то об'єкт характеризується позитивним самовирівнюванням і є стійким статичним об'єктом. (Приклад: двигун з незалежним збудженням. Двигун з послідовним збудженням є не стійким – при зникненні навантаження він іде в „розніс”)

Властивість *запізнення* проявляється в тому, що вихідна величина з'являється при досягненні усталеного значення не одночасно з початком керуючої або збуджуючої дії. Інтервал часу від початку дії до усталеного значення вихідної величини називається *часом перехідного процесу* (час

розгону об'єкту). Перехідний процес характеризує *інерційність* об'єкту, що обумовлена властивістю об'єкту накопичувати енергію або речовину, наявністю трансмісії та опору її розповсюдження.

Властивість накопичення енергії або речовини називається *акумулюючою* здатністю об'єкту, що характеризується величиною *ємності*. Відношення величини ємності до значення вихідної величини називається *коефіцієнтом ємності*.

$$c = \int_0^{H_0} S dH = SH_0 \text{ ємність об'єкту.}$$

$C/H_0 = S$ – коефіцієнт ємності.

Об'єкти різної фізичної природи об'єднує поняття подібності.

Багатоємнісні об'єкти – мають декілька ємностей і перехід енергії з одної в іншу зустрічає опір.

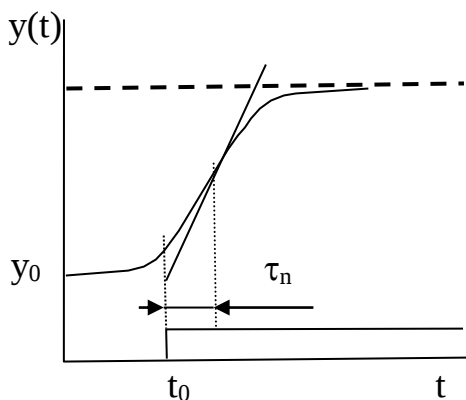
Час розгону знаходиться при вирішенні рівняння:

$$c = \int_0^T \Delta Q dt = \Delta Q \rightarrow T = SH_0 / \Delta Q = C / \Delta Q$$

З рівняння Стодоли границя відхилення вихідної величини складе:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varphi = \lim_{t \rightarrow \infty} (1 - e^{-t/T_n}) k\mu = k\mu$$

де T_n – стала часу об'єкту.



Усталене значення вихідної величини практично настає при $t = 3T_n$ (95%).

В безінерційних об'єктах швидкість зміни вихідної величини становить:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\mu}{T_n} e^{-t/T_n} = k\mu e^{-t/T_n}$$

В багатоємнісних об'єктах існує час перехідного запізнення - τ_n . Крім того, об'єкт може мати транспортне запізнення - τ_m . Тоді повне запізнення складе:

$$\tau = \tau_m + \tau_n$$

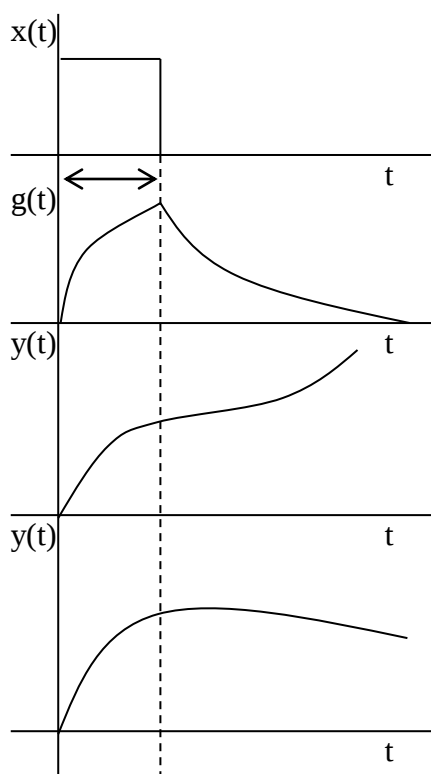
Значення коефіцієнта передачі, сталих часу, час запізнення отримують за результатами експериментальних досліджень кожного конкретного об'єкту.

2.0 АНАЛІЗ АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

2.1 Стійкість лінійних систем автоматичного керування

Точність виконання технологічного процесу залежить від роботоздатності АСК, що визначається її стійкістю.

При прикладенні до АСК будь-якої дії її рух може бути різним, але з умов стійкості роботи він буде стійким, не стійким і на межі стійкості.



АСК є *стійкою*, якщо вона повертається до усталеного режиму, після припинення дії збурення, що вивело її з цього стану.

Нестійка система не повертається до усталеного стану рівноваги, з якого вона вийшла. Вихідна величина такої системи безперервно збільшується або здійснює недопустимі великі коливання.

О.М.Ляпунов запропонував оцінювати стійкість системи на основі аналізу рівняння динаміки, що описує систему.

Рівняння системи в період T характеризується диференціальним рівнянням при $x(t)=0$, тобто однорідним рівнянням (із сталими коефіцієнтами):

$$a_0 \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dy(t)}{dt} + a_n y(t) = 0$$

В операторній формі

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

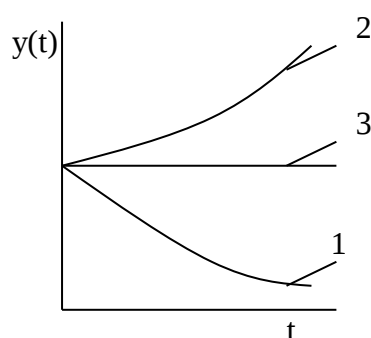
Загальним розв'язком даного диференціального рівняння буде:

$$y(t) = \sum_{i=1}^n c_i e^{\lambda_i t}$$

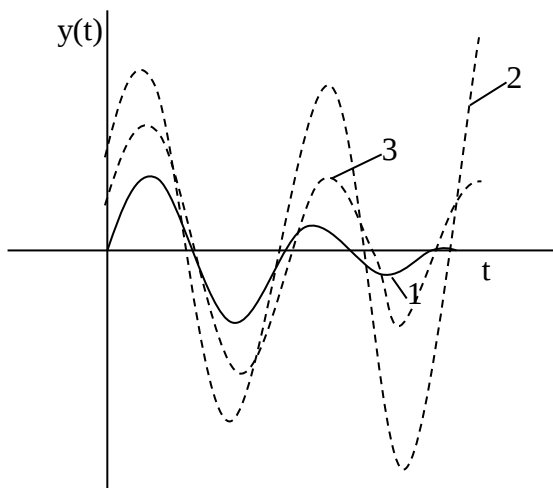
де λ_i – корені характеристичного рівняння;

c_i – стала, що визначається початковими умовами.

Корені можуть бути дійсними та комплексними.



Аналіз отриманого рішення показує, що при $\lambda = -\alpha$ (негативний корінь) – процес затухає (крива 1) – стійка система; при $\lambda = \alpha$ (позитивний корінь) – процес розходиться (крива 2) – система нестійка; при $\lambda = 0$ – процес не змінює свого стану (лінія 3) – система знаходиться на межі стійкості.

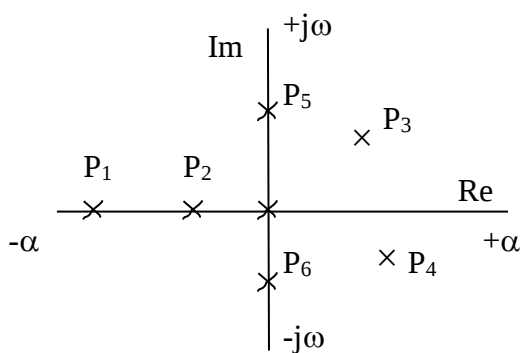


При одержанні комплексних коренів:

$$\lambda = \pm \alpha \pm j\omega \quad (y(t) = ce^{\alpha t} \sin(\omega t + \varphi))$$

1. $\lambda = -\alpha \pm j\omega$ - затухаючі коливання (крива 1) – система стійка.
2. $\lambda = \alpha \pm j\omega$ - коливання розходяться (крива 2) – система нестійка.
3. $\lambda = \pm j\omega$ - коливання з сталою амплітудою, не затухають (крива 3) – система на межі стійкості.

В загальному випадку:



стійка – корені повинні бути від'ємними, а комплексні корені мали б від'ємну дійсну частину;
нестійка – хоча б один корінь буде позитивний;
на межі стійкості – при наявності нульового кореня або пари чисто умовних коренів, що лежать на умовній вісі.

Труднощі виникають при розв'язуванні характеристичних рівнянь високих порядків (при $n > 4$), тому були розроблено ряд принципів, що дозволили визначити стійкість автоматичних систем не обчислюючи коренів характеристичного рівняння. Ці принципи називаються критеріями стійкості.

2.2 Критерії стійкості

Це математична формулювання умов, яким задовольняють коефіцієнти характеристичного рівняння системи автоматичного керування.

Існує декілька критеріїв, але з математичної точки зору вони всі еквівалентні.

Всі критерії поділяються на дві групи:

- алгебраїчні;
- частотні.

2.2.1 Алгебраїчні критерії

Визначають сукупність алгебраїчних нерівностей, що описують зв'язки між коефіцієнтами характеристичного рівняння системи.

Критерій Рауса (1877р.)

Хай є характеристичне рівняння системи:

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

Складається таблиця (матриця) Рауса:

$$\begin{vmatrix} a_0 & a_2 & a_4 & . \\ a_1 & a_3 & a_5 & . \\ b_0 & b_2 & b_4 & . \\ b_1 & b_3 & b_5 & . \\ c_0 & c_2 & c_4 & . \\ . & . & . & . \end{vmatrix}$$

Число строчок матриці дорівнює $n+1$.

Коефіцієнти утворюються за наступним правилом:

$a_0; a_1; a_2 \dots a_n$ – коефіцієнти характеристичного рівняння.

$b_0 = a_2 - a_0 a_3 / a_1 = a_2 - \lambda_1 a_3$; $b_2 = a_4 - \lambda_1 a_5$ і т.д.

$b_1 = a_3 - a_1 b_0 / b_2 = a_3 - \lambda_2 b_2$; $b_3 = a_5 - \lambda_2 b_4$; $b_5 = a_7 - \lambda_2 b_6$ і т.д.

$c_0 = b_2 - b_0 b_3 / b_1$ і т.д.

Критерій формулюється таким чином: для стійкості системи необхідно і достатньо, щоб коефіцієнти першого стовпчика таблиці були позитивними.

Приклад:

$$4p^4 + 7p^3 + 5p^2 + 3p + 1 = 0$$

кількість строчок $n+1=4+1=5$

$$\begin{vmatrix} a_0 & a_2 & a_4 \\ a_1 & a_3 & a_5 \\ b_0 & b_2 & b_4 \\ b_1 & b_3 & b_5 \\ c_0 & c_2 & c_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 4 & 5 & 1 \\ 7 & 3 & 0 \\ 23/7 & 1 & 0 \\ 20/23 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

$$b_0 = 5 - 4 \cdot 3 / 7 = 23/7; \quad b_2 = 1 - 4 \cdot 0 / 7 = 1; \quad b_1 = 3 - 7 \cdot 1 / 23/7 = 20/23; \quad b_3 = 0 - 0 \cdot 49 / 23 = 0;$$

$$c_0 = 1 - 0 \cdot 23/7 / 20/23 = 1$$

Дана система стійка.

Критерій Гурвіца (1895р.)

Базується на визначенні табличного запису коефіцієнтів характеристичного рівняння:

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

і формулює умову стійкості в залежності від знаків визначників.

Визначник Гурвіца складається таким чином: коефіцієнти від a_1 до a_n розташовуються за головною діагоналею в порядку зростання. Вверх від головної діагоналі в стовпчиках записують коефіцієнти з послідовно зростаючими індексами, а вниз – з індексами, що зменшуються. На місцях коефіцієнти, індекси яких $> n$ та < 0 проставляють 0.

$$\Delta n \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \cdot & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \cdot & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & a_n \end{vmatrix}$$

Критерій встановлює, що система стійка тоді та тільки тоді, коли всі діагональні мінори більше нуля, тобто співпадають за знаком з першим коефіцієнтом a_0 .

$$\Delta_0 = a_0 > 0; \Delta_1 = a_1 > 0; \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} > 0; \Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} > 0; \dots$$

$$\Delta_n > 0.$$

Приклад:

$$p^5 + 3p^4 + 5p^3 + 7p^2 + 2p + 2 = 0$$

$$\Delta_5 = \begin{vmatrix} 3 & 7 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 5 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 7 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 5 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 7 & 2 \end{vmatrix};$$

$$a_0 = 1 > 0; \Delta_1 = 3 > 0; \Delta_2 = \begin{vmatrix} 3 & 7 \\ 1 & 5 \end{vmatrix} = 8 > 0; \Delta_3 = \begin{vmatrix} 3 & 7 & 2 \\ 1 & 5 & 2 \\ 0 & 3 & 7 \end{vmatrix} = 105 + 6 - 49 - 18 = 44 > 0;$$

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} 3 & 7 & 2 & 0 \\ 1 & 5 & 2 & 0 \\ 0 & 3 & 7 & 2 \\ 0 & 1 & 5 & 2 \end{vmatrix} = 2\Delta_3 - 2 \begin{vmatrix} 3 & 7 & 2 \\ 1 & 5 & 2 \\ 0 & 1 & 5 \end{vmatrix} = 88 - 2 \cdot 36 = 16 > 0; \Delta_5 = 2\Delta_4 = 32 > 0.$$

Система стійка.

Критерій Гурвіца застосовують для рівнянь до п'ятого порядку.

Порівняння критеріїв Рауса та Гурвіца показує, що перший має алгоритмічний характер (елементи з'являються в результаті розрахунку), а другий – замкнуту форму. Раніше частіше використовувався критерій Гурвіца. З появою цифрових обчислювальних машин, для лінійних систем високого порядку, застосовують критерій Рауса.

2.2.2 Частотні критерії

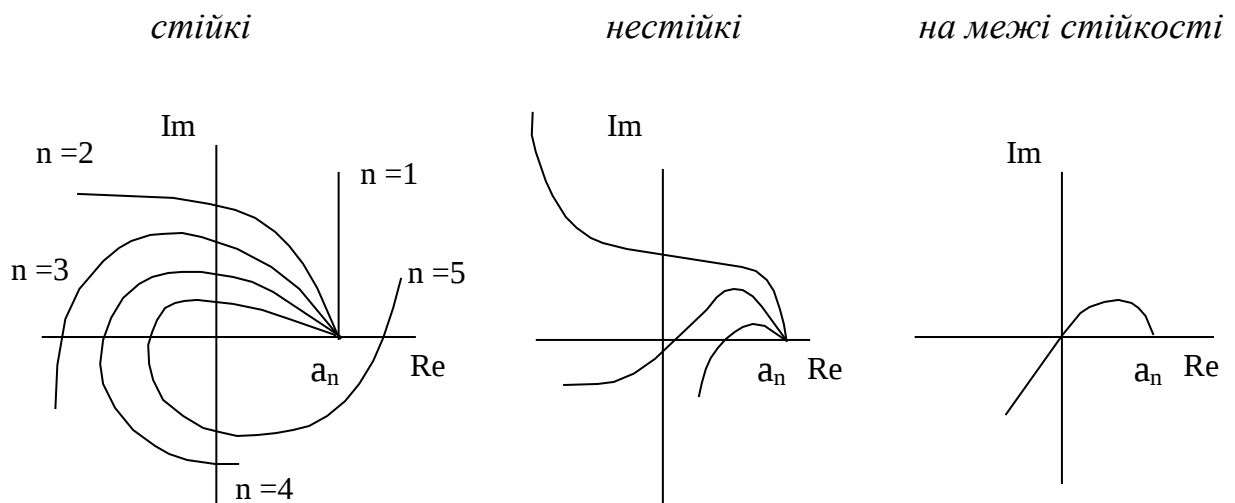
Належать до графо-аналітичних методів. Стійкість системи оцінюється за характером годографа частотної характеристики. Дані критерії придатні для аналізу рівнянь будь-якого порядку. Методика визначення стійкості за частотними критеріями справедлива для систем з розподіленими та зосередженими параметрами, а також для систем з запізненням.

Критерій Михайлова (1938р.)

Характеристичне рівняння будь-якого ступеня $G(p)=0$ можна подати у вигляді комплексного поліному. Після підстановки $p=j\omega$ і розподілу дійсної та уявної частин, отримаємо:

$$G(j\omega) = \text{Re}(\omega) + j\text{Im}(\omega).$$

А.В. Михайлов довів, що для стійкості системи необхідно та достатньо, щоб при зміні кутової частоти ω від 0 до ∞ годограф, що описується кінцем вектора $G(j\omega)$, починався на дійсній додатній напіввісі та, обертаючись тільки проти годинникової стрілки, ніде не перетворювався в нуль, проходив послідовно число квадрантів, що дорівнює ступені n характеристичного рівняння, повертаючись на кут $n\pi/2$.



Приклад:

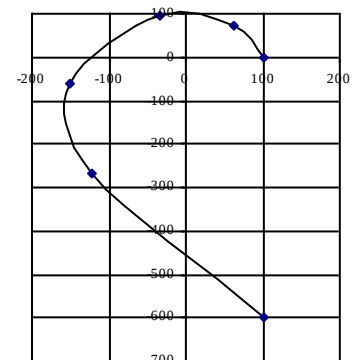
$$G(p) = 0,1p^4 + p^3 + 10p^2 + 40p + 100 = 0$$

$$p = j\omega \rightarrow \text{Re}(\omega) = 0,1\omega^4 - 10\omega^2 + 100;$$

$$\text{Im}(\omega) = -\omega^3 + 40\omega.$$

Задаючи значення ω від 0 до ∞ , обчислюємо $\text{Re}(\omega)$ та $\text{Im}(\omega)$ і заносимо результати в таблицю.

ω	0	2	4	7	9	10	∞
$\text{Re}(\omega)$	100	61,6	-34,4	-150	-54	100	$+\infty$
$\text{Im}(\omega)$	0	72	96	-63	-269	-600	$-\infty$



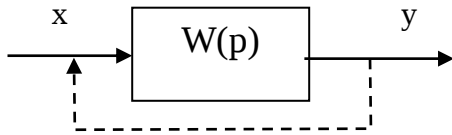
Годограф повернувся на $\varphi = 4\pi/2$.

Система стійка.

Критерій Найквіста (1932р.)

Дає змогу робити висновок про стійкість замкнутої системи за амплітудно-фазовою характеристикою цієї самої системи в розімкнутому стані.

Хай є розімкнута система.



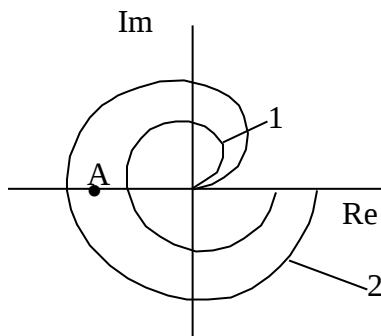
Рівняння $G(p) = H(p)x$. Якщо замкнути систему ($x = -y$), отримаємо рівняння замкнутої системи $E(p) = [G(p) + H(p)]y = 0$. Заміняючи p на $j\omega$, отримаємо

$$T(j\omega) = \frac{E(j\omega)}{G(j\omega)} = 1 + W(j\omega)$$

Поліном $E(p)$ (оператор замкненої системи) має стільки ж коренів, що і поліном $G(p)$. Аналіз замкненої системи в розімкнутому стані показує, що вона може бути стійкою або нестійкою.

Система, що стійка в розімкнутому стані, буде стійкою і в замкнутому стані, якщо амплітуднофазова частотна характеристика цієї системи в розімкнутому стані не охоплює точку з координатами $[-1; j0]$.

$A[-1; j0]$



1- стійка;

2 – нестійка.

Якщо АФЧХ проходить через точку $A[-1; j0]$, то система знаходиться на межі стійкості (нейтральний стан).

Приклад:

$$W_{роз}(p) = \frac{50}{3p^3 + 76p^2 + 25p}$$

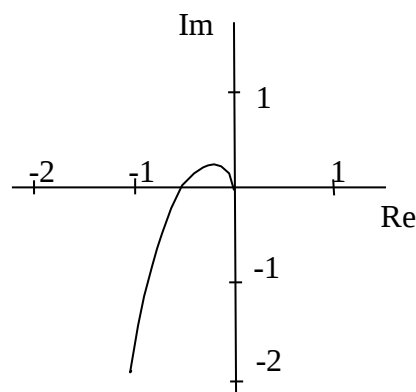
На перший погляд система знаходиться на межі стійкості ($p_1=0$; $p_{2,3}$ мають від'ємний знак). Підставимо $p=j\omega$ і розподілимо на дійсну та уявну частини.

$$W_{роз}(j\omega) = \frac{50}{-3j\omega^3 - 76\omega^2 + 25j\omega} = \frac{-3800}{9\omega^4 + 5620\omega^2 + 625} + j \frac{150\omega^2 - 1250}{9\omega^5 + 5620\omega^3 + 625\omega}$$

Складемо таблицю

ω	0	1	2	10	∞
$\text{Re}(\omega)$	-6,1	-6,1	-0,16	-0,006	0
$\text{Im}(\omega)$	$-\infty$	-0,18	-0,01	0,002	0

Годограф не обходить точку $[-1; j0]$ – замкнута система стійка.



2.3 Запаси стійкості

Запас стійкості характеризує віддаленість параметрів системи від межі стійкості. Знаходження системи на межі стійкості можна визначати за допомогою критерію стійкості.

Запас стійкості оцінюється величиною Δ_{n-1} мінора Гурвіца або віддаленістю годографа Михайлова від початку координат, годограф Найквіста не повинен доходити до точки $A[-1;j0]$. Розглядаючи годограф Найквіста, слід підкреслити, що значення модуля при сталій частоті залежить від коефіцієнта підсилення. Підвищення коефіцієнта підсилення призводить до виходу автоматичної системи за межі стійкості.

В сільськогосподарському виробництві значна частина об'єктів керування має в своєму складі ланку чистого запізнення:

$$W_{роз}(p) = W_{роз}^*(p)e^{-p\tau},$$

де $W_{роз}^*$ – передаточна функція лінійної ланки;

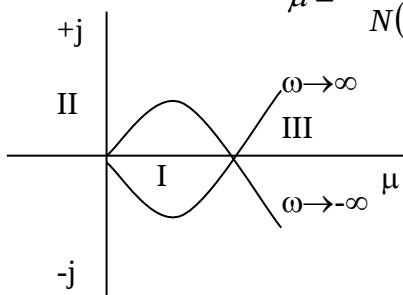
τ - час чистого запізнення.

Ланка чистого запізнення не змінює амплітуду годографа, але створює додатковий від'ємний зсув за фазою, що залежить від частоти.

Для забезпечення заданих показників системи ряд її параметрів роблять регульованими. Щоб система не вийшла за межі стійкості, визначають область, де зміна параметрів регулювання не викликає порушення стійкості системи. Область стійкості будують за будь-яким критерієм, але найбільш просто її можна отримати за допомогою метода *D-поділення* (Ю.І.Неймарк, 1948р.). (В основі метода лежить критерій Михайлова). Хай система знаходиться на коливальній межі стійкості, тобто характеристичний вектор $D(j\omega)=0$ і хай параметр, що регулюється, входить в це рівняння.

$$D(p) = \mu N(p) + M(p) = 0$$

$$\mu = -\frac{M(p)}{N(p)} = -\frac{M(j\omega)}{N(j\omega)} = X(\omega) + jY(\omega) \quad \text{при } -\infty < \omega < \infty$$



Якщо підставити значення ω від $-\infty$ до ∞ , отримаємо криву, що розбиває площину на три області, де I - область стійкості.

Приклад:

Хай характеристичне рівняння автоматичної системи керування має вигляд:

$$T_0 T_2^2 p^4 + (T_0 T_2 + T_2^2) p^3 + (T_0^2 + T_1) p^2 + p + k \cdot k_y = 0$$

де $T_0 = 1\text{с}$; $T_1 = 0,004\text{с}$; $T_2 = 0,06\text{с}$; $k = 5$; k_y – коефіцієнт керуючого елементу

Підставимо значення та знайдемо:

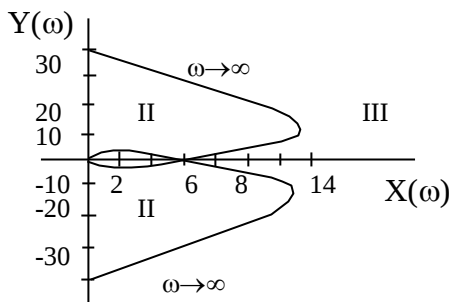
$$k_y = -0,0007p^4 - 0,0087p^3 - 0,208p^2 - 0,2p$$

Замінемо $p=j\omega$ і після перетворень отримаємо:

$$k_y = \omega^2(0,208 - 0,0007\omega^2) + j\omega(0,0087\omega^2 - 0,2) = X(\omega) + jY(\omega)$$

Результати обчислень подані в таблиці

ω	0	1	2	3	4	4,8	10	15	20	∞
$X(\omega)$	0	0,21	0,83	1,85	2,96	4,42	13,8	11,36	-32,0	$-\infty$
$Y(\omega)$	0	-0,19	-0,33	-0,36	-0,24	0	6,7	25,4	61,6	$+\infty$



Область стійкості (0...4,42). $k_y=4,42$ – межа стійкості.

Перевірку проведемо за критерієм Гурвіца.

Хай $k_y=1$. Тоді рівняння прийме вигляд:

$$0,0036p^4 + 0,043p^3 + 1,04p^2 + p + 5 = 0$$

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} 0.043 & 1 & 0 & 0 \\ 0.0036 & 1.04 & 5 & 0 \\ 0 & 0.043 & 1 & 0 \\ 0 & 0.0036 & 1.04 & 5 \end{vmatrix} \approx 0.16 > 0$$

$$\Delta_2 = 0,042 > 0$$

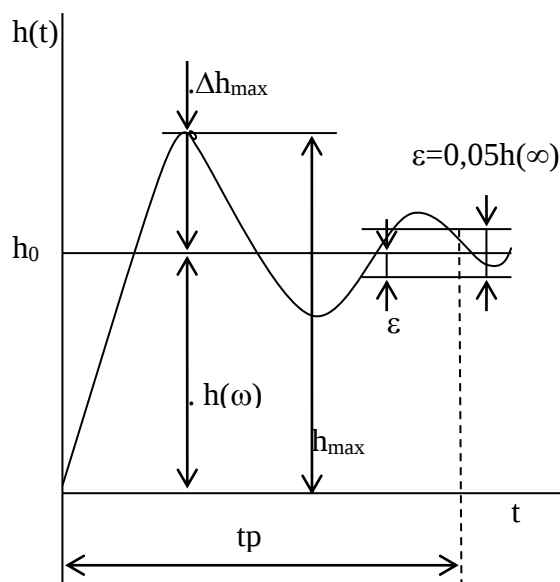
Система стійка при зміні k_y в області (0...4,42)

2.4 Якість роботи автоматичних систем керування

Стійкість АСК – необхідна, але далеко не достатня умова доцільності її застосування. Очевидно, що стійка система при відпрацьовуванні різних сигналів може бути недостатньо точною, перехідні процеси керування в ній можуть затухати надто повільно, не буде забезпечена плавність зміни виходу. Комплекс вимог, що визначають поведінку системи в усталеному та перехідному процесах відпрацьовування заданої дії, об'єднується поняттям *якості процесу керування*. (Вимоги до цього комплексу висовуються практикою). Основними показниками якості є:

- час регулювання;
- перерегулювання;
- коливальність;
- усталена похибка.

Інколи, в конкретних умовах, до якості регулювання додають і інші вимоги, наприклад, максимальна швидкість зміни величини, що регулюються.



Час регулювання – t_p , називається час, протягом якого, починаючи з моменту прикладення дії на систему, відхилення величини, що регулюється – $h(t)$ від її усталеного значення – $h_0 = h(\infty)$ – буде менше наперед заданої величини ε (найчастіше приймають, що $\varepsilon \leq 5\%$). Час регулювання визначає тривалість (швидкодію) перехідного процесу.

Перерегулювання – σ , називається максимальне відхилення Δh_{max} , величини

що регулюється від усталеного значення та подається у відсотках від $h_0 = h(\infty)$.

Абсолютне значення $\Delta h_{\max}$ визначається за кривою перехідного процесу:

$$\Delta h_{\max} = h_{\max} - h(\infty)$$

$$\sigma\% = \frac{h_{\max} - h(\infty)}{h(\infty)} \cdot 100\%$$

Коливальність – характеризується числом коливань, величини, що регулюється за час регулювання t_p . Якщо система здійснила число коливань менше заданого, то вважається, що вона має якість регулювання за коливальністю.

Усталена похибка – δ - усталене значення, величини, що регулюється, після закінчення перехідного процесу. Залежить від астатизму системи. В астатичних системах $\delta = 0$ ($\varepsilon_0 = \varepsilon(\infty) = 0$), тобто усталене значення, величини, що регулюються h_0 , буде дорівнювати її заданому значенню. В статичних системах $\delta \neq 0$ і h_0 буде відрізнятись від заданого значення на величину усталеної похибки. Величина похибки залежить від величини вхідної дії, коефіцієнт передачі об'єкта та регулятора.

Показники якості системи регулювання можна безпосередньо визначити із графіка перехідного процесу. Але для побудови графіка необхідно або вирішувати диференціальне рівняння системи, або експериментально отримувати графік перехідного процесу (*прямий підхід*). Ці два моменти на практиці не завжди легко здійснити. В інженерній практиці знаходять широке застосування *непрямі оцінки якості*, тобто такі величини, що в той чи інший мірі характеризують окремі особливості перехідного процесу.

Непрямі методи для лінійних систем з постійними параметрами поділяються на три групи:

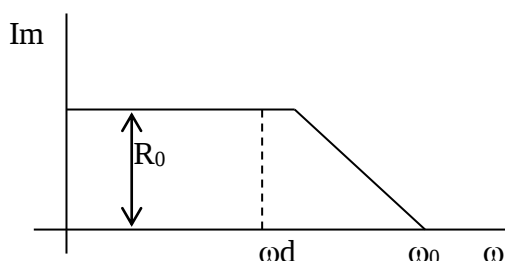
- частотні;
- інтегральні
- кореневі.

Частотні методи.

Допускають сумісне дослідження якості та стійкості системи і мають достатню точність. Ці методи були розроблені В.В.Солодовніковим і основані на загальних властивостях амплітудно-фазових і дійсних частотних характеристик. Користуючись дійсною характеристикою будують наближену криву перехідного процесу. Перехідний процес $y(t)$, що виникає як результат дії одиничного імпульсу, і дійсна частотна характеристика пов'язані залежністю:

$$y(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\text{Re}(\omega)}{\omega} \sin \omega t \cdot d\omega$$

Задача зводиться до наближеного розв'язання правої частини даного виразу.



Для цього криву дійсної частотної характеристики апроксимують ламаною лінією. При цьому утворюються трапеції

або трикутники. (Для полегшення вводять типові трапеції та трикутники).

Наприклад, одинична типова трапецевидна характеристика визначається висотою $R_0=1$, інтервалом пропускання частот $\omega_0=1$, інтервалом рівномірного пропускання частот $\omega_d < 1$ та коефіцієнтом нахилу $\chi = \omega_d/\omega_0$.

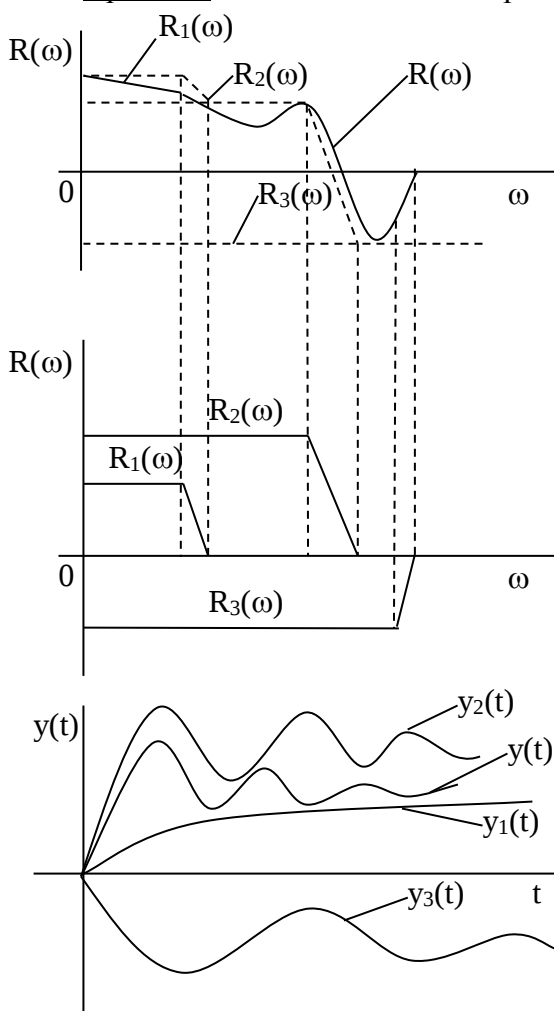
Перехідний процес, що відповідає одиничній типовій трапеції, визначається за формулою:

$$h_\chi(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{1-\chi} \left[\text{si } t - \chi \text{si } \chi t + \frac{\cos t - \cos \chi t}{t} \right]$$

де $\text{si } t$ – інтегральний синус, значення якого беруться з а спеціальними математичними таблицями.

(Якщо R_0 та ω_0 в реальних умовах відрізняються від одиниці, то значення функції $h_\chi(t)$ помножується на R_0 , а значення аргументу ділиться на ω_0).

Приклад: Хай задана дійсна характеристика.



Треба побудувати криву перехідного процесу системи.

1. Замінімо $R(\omega)$ сумою трьох трапецевидних характеристик $R_1(\omega)$, $R_2(\omega)$ та $R_3(\omega)$ (при цьому $\sum R_i(0)=1$).
2. За таблицями $h(t)$ в залежності від t та χ знаходимо параметри перехідного процесу одиничних трапецій і будують криві перехідного процесу $y_1(t)$, $y_2(t)$ та $y_3(t)$.
3. Проводимо геометричне сумування та отримаємо наближену криву перехідного процесу $y(t)$.

Основною перевагою частотного методу – можливість використати не тільки розрахункових, але й експериментальних характеристик розімкнутих систем для визначення якості після замикання її зворотним зв'язком.

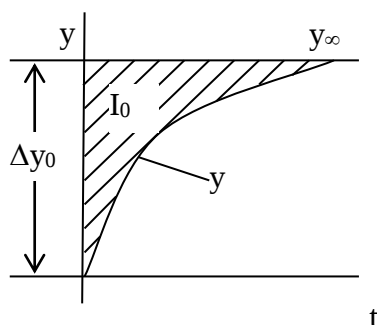
Інтегральні методи.

Базується на обчисленні визначених інтегралів без розв'язування диференціальних рівнянь системи:

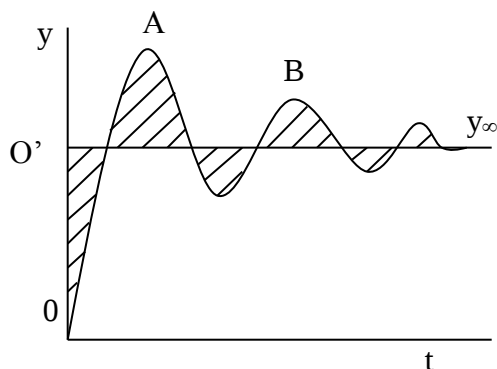
$$I_0 = \int_0^\infty \Delta y dt; \quad I_1 = \int_0^\infty (\Delta y)^2 dt; \quad I_2 = \int_0^\infty [(\Delta y)^2 + T(\Delta y')^2] dt.$$

де Δy - відхилення параметра, що регулюється, від заданого значення;
 T – стала часу.

Розрізняють *лінійні* та *квадратичні* інтегральні оцінки.



Інтеграл I_0 (*лінійна оцінка*) визначає площу над кривою переходного процесу, якщо відхилення Δy відраховувати від нового усталеного значення y_∞ . Зменшення величини інтегралу I_0 характеризує прискорення процесу регулювання. За величиною цього інтегралу оцінюється швидкодія системи, що має часову характеристику без перерегулювання (монотонна).



Для переходного процесу з перерегулюванням застосовують оцінку за величиною інтегралу I_1 . Цей інтеграл визначає якість процесу за *квадратичною* сумою площ, що розташовані між кривою переходного процесу та прямою нового усталеного значення y_∞ . Чим менше величина I_1 , тим ближче реальна крива переходного процесу до ідеального (ОО'В').

I_1 характеризує тільки величину відхилення та швидкість затухання, але не враховує наближення системи до коливальної межі стійкості. В зв'язку з цим застосовують квадратичну інтегральну оцінку I_2 .

Коливальність процесу визначають інтегралом I_2 , який враховує відхилення Δy , величини що регулюється, від її усталеного значення та швидкість зміни ($\Delta y'$) цього відхилення. При відомій сталій T , I_2 має мінімум при $T\Delta y' + \Delta y = 0$. Тобто найкращі показники має система, перехідний процес якої описується виразом:

$$\Delta y = \Delta y_0 \exp(-t/T)$$

Інтегральна оцінка покладена в основу аналітичного конструювання регуляторів. Кількісне (числове) подання показника якості дає можливість автоматично вирішити цю задачу та створювати самооптимізуючі системи з заданим алгоритмом.

Інтегральні оцінки добрі в тому, що вони являють собою єдиний числовий критерій якості роботи автоматичної системи керування.

Кореневі методи.

Під загальною назвою корневих методів об'єднують різні способи оцінки якості переходного процесу за розташуванням нулів і полюсів передаточної

функції замкнутої системи в комплексній площині коренів $p = \sigma + j\omega$. Максимальну можливість при цьому дають дослідження кореневого годографа. Але труднощі побудови кореневого годографа складних систем, обмежують застосування кореневих методів в інженерній практиці. За допомогою кореневих методів в теорії автоматичного керування здійснене детальне дослідження якості лінійних систем, що описуються диференціальним рівнянням третього ступеня.

Хай задане рівняння третього ступеня:

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

Для приведення до нормального вигляду поділимо його на a_3 та введемо нову змінну:

$$q = p \cdot \sqrt[3]{\frac{a_0}{a_3}} = \frac{p}{\Omega_0}$$

Маємо

$$q^3 + Aq^2 + Bq + 1 = 0$$

де коефіцієнти:

$$A = \frac{a_1 \Omega_0^2}{a_3} = \frac{a_1}{\sqrt[3]{a_0^2 a_3}}; \quad B = \frac{a_2 \Omega_0}{a_3} = \frac{a_2}{\sqrt[3]{a_0 a_3^2}},$$

називаються параметрами Вишеградського (1876р.)

Умова стійкості системи третього порядку є:

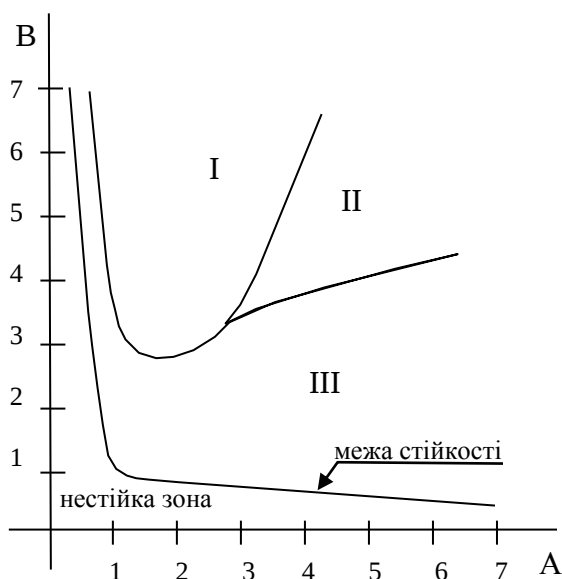
1. $A \cdot B > 1$ - система стійка.
2. $A \cdot B < 1$ - система нестійка.
3. $A \cdot B = 1$ - на межі стійкості.

I – зона монотонних процесів – коливання швидко затухають;

II – зона аперіодичних процесів – всі корені дійсні і від'ємні (стійка зона);

III – зона швидко затухаючих експонент (один дійсний та два комплексні)

На діаграмі можна нанести допоміжні лінії та розбити діаграму Вишеградського на дрібніші частини, тобто отримати повнішу інформацію про стійкість системи та її запас стійкості.

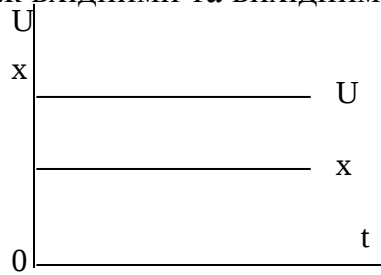


2.5 Підвищення точності та методи покращення якості автоматичного регулювання

2.5.1 Поняття про закони регулювання

Закон регулювання $U=f(x)$ називається залежність між вихідною дією, що керується (U) і його вхідною керуючою дією (x) без врахування інерційності складових елементів.

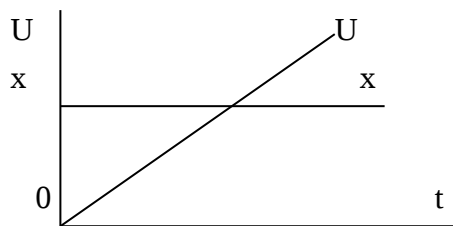
- а) *пропорційний закон* – характеризується пропорційною залежністю між вхідними та вихідними координатами



$$U = k_1 x$$

(характеризує велику швидкість дії)

- б) *інтегральний закон* – встановлює пропорційну залежність між швидкістю зміни між швидкістю зміни регульованої величини

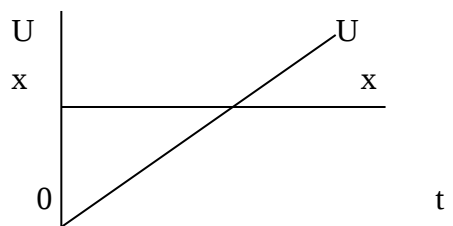


$$dU/dt = k_2 x$$

$$U = k_2 \int_0^t x dt$$

(характеризує високу точність дії)

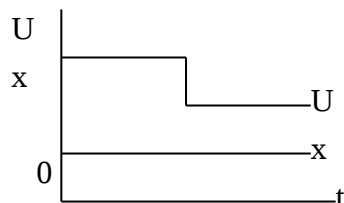
- в) *пропорційно-інтегральний закон* – об'єднує два закони регулювання: пропорційний і інтегральний



$$U = xk_1 + k_3 \int_0^t x dt$$

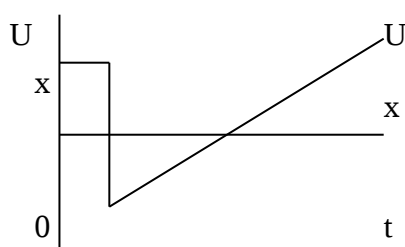
Регулювання за цим законом ще називають ізодромним (об'єднує швидкість і точність дії)

- г) *пропорційно-диференціальний закон* – регулювання проводиться за першою похідною від похибки (цей закон не має самостійного значення, так як при сталому значенні похідна дорівнює нулю – регулювання призупиняється)



$$U = k_1 x + k_4 \frac{dx}{dt}$$

- д) *пропорційно-інтегрально-диференціальний закон* – об'єднує попередні закони



$$U = xk_1 + k_2 \int_0^t x dt + k_4 \frac{dx}{dt}$$

2.5.2 Методи підвищення точності автоматичного регулювання

До загальних методів підвищення точності відносять:

- *підвищення коефіцієнта підсилення* розімкнутого кола – є найбільш універсальним і ефективним методом. На практиці це досягається за рахунок введення підсилювачів. Підвищення коефіцієнта призводить до зменшення похибки в усіх типових режимах (коефіцієнт входить в знаменник розрахункових виразів). Проте підвищення обмежується стійкістю системи. При підвищенні коефіцієнта система наближається до межі стійкості. Це призводить до необхідності розробки коректуючих пристроїв;
- *підвищення порядку астатизму* – формально це зводиться до приведення до нуля перших коефіцієнтів похибок системи. На практиці – здійсненням вводу інтегруючих кіл;
- *застосування регулювання за похідною від похибки* – здійснюється вводом диференціальних ланок.

Під поняттям покращення якості процесу регулювання, розуміють зміну динамічних властивостей системи регулювання з метою отримання необхідного запасу стійкості та швидкодії. При вирішенні задачі підвищення запасу стійкості спочатку намагаються змінити параметри окремих ланок. Якщо не вдається в рамках системи досягти бажаних результатів – змінюють її структуру: вводять коректуючі засоби, дія яких аналогічна введенню в закон регулювання похідних або інтегралів.

Введення похідної в закон регулювання.

П – підсилювач; *КО* – керуючий орган; *ДЛ* – диференціальна ланка; *СО* – сприймаючий орган; *ОК* – об'єкт керування.

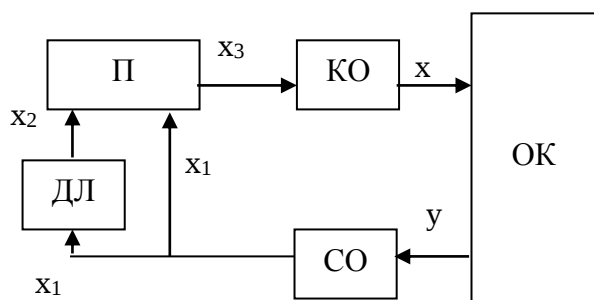
Сигнал на виході диференційної ланки $x_2 = k dx_1/dt$. Сприймаючий орган подає на входи *ДЛ* та *П* сигнал $x_1 = k_1 y$. На *П* поступає сумарний сигнал $x_3 = k_2(x_1 - x_2)$. *КО* діє на *ОК* $x = k_3 x_3$. Тоді закон регулювання буде:

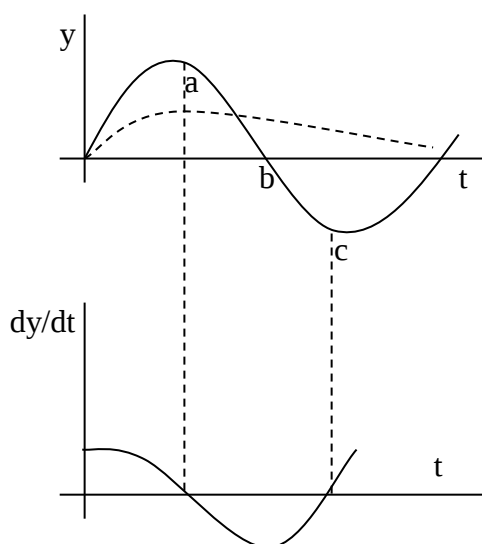
$$x = k_p \left(y + k \frac{dy}{dt} \right)$$

де $k = k_1 k_2 k_3$ – загальний передаточний коефіцієнт.

Таким чином, зміна регулюючої дії x на *ОК* залежить не тільки від відхилення керуючої величини, але й від швидкості цього відхилення dy/dt , тобто в цей закон регулювання введена похідна.

Введення похідної призводить до зменшення амплітуди та довжини коливаний перехідного процесу. Якщо регулятор пропорційної дії ($y = k_p x$), то до тих пір доки $y > 0$, регулятор зменшує позитивне відхилення. При $y < 0$ регулювання буде діяти в зворотному напрямку.



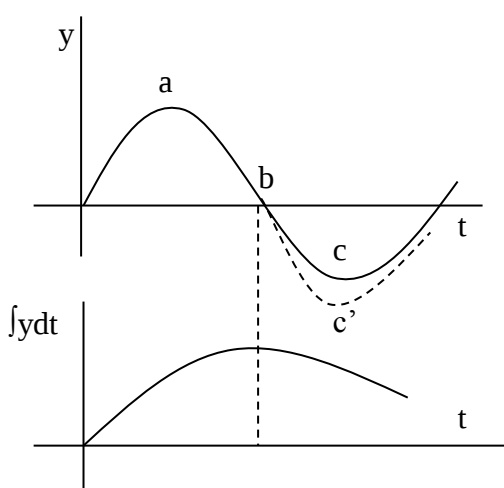


Сигнал за похідною dy/dt збільшує затухання коливань, а сигнал за відхиленням y – зменшує статичну похибку.

Введення інтеграла в закон регулювання.

Дозволяє отримати астатичну систему ($\delta=0$). Закон регулювання буде:

$$x = k_p \left(y + k \int y dt \right)$$



Інтеграл визначає площу під кривою зміни відхилення величини, що регулюється. Звідси інтегруюча ланка, як корекція, здійснює вплив головним чином в кінці перехідного процесу і ліквідує статичну похибку в усталеному режимі. Введення інтегруючої ланки в коливальну систему, в протизагальності аперіодичній системі, може призвести до збільшення її коливальності (bc') і привести до нестійкості.

Для покращення якості регулювання застосовують комбінаційні послідовні коректуючі пристрої, що складаються з диференційної та інтегральної ланок. В цьому випадку диференційна ланка зменшує схильність системи до коливань, а інтегруюча – зменшує статичну похибку. (Іншими словами, похідна покращує процес регулювання в перехідному режимі, а інтеграл – в статичному).

2.6 Аналіз нелінійних систем автоматичного керування

2.6.1 Загальні поняття нелінійних систем

Нелінійними називаються автоматичні системи, динаміка руху яких описується нелінійними диференціальними рівняннями. Не лінійність диференціальних рівнянь обумовлена нелінійною характеристикою елементів

системи. Якщо в системі є хоча б одна ланка з нелінійною статичною характеристикою, то вся система буде нелінійною.

Динамічні характеристики нелінійних елементів описуються нелінійними диференціальними рівняннями, точне інтегрування яких, як правило, неможливе.

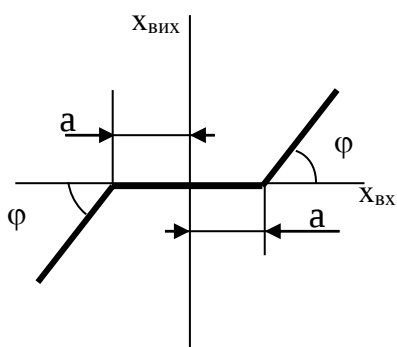
Майже всі реальні елементи автоматичних систем нелінійні і лише наближено їх вважають лінійними.

Не лінійності розбивають на дві групи: *несуттєві* та *суттєві*.

До першої відносять такі не лінійності, на яких при малому діапазоні зміни аргументу, вибирають ділянки близькі до лінійних і заміняють їх лінійними ділянками. Динамічні розрахунки таких систем ведуть як для лінійних.

До других відносять не лінійності, що бувають розривними або неоднозначними функціями, або функціями, що мають злам:

а) *нечутливість* – при зростанні вхідного сигналу $x_{вх}$ за модулем в один чи інший бік від нуля до деякого значення $\pm a$, цей сигнал через нелінійний елемент не проходить.



Статична характеристика:

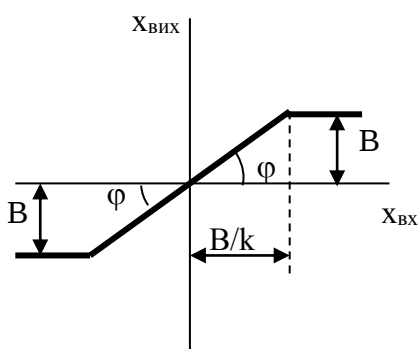
$$\begin{cases} x_{вих} = 0 \text{ при } |x_{вх}| \leq a \\ x_{вих} = k(x_{вх} - a) \text{ при } x_{вх} \geq a \\ x_{вих} = k(x_{вх} + a) \text{ при } x_{вх} \leq -a \end{cases}$$

$k = \tan \varphi$ - коефіцієнт пропорційності.

Величина $2a$ називається зоною нечутливості елемента.

Приклад: механічний підсилювач

б) *обмеженість* – вихідна величина не може перевищувати за модулем певну межу B .

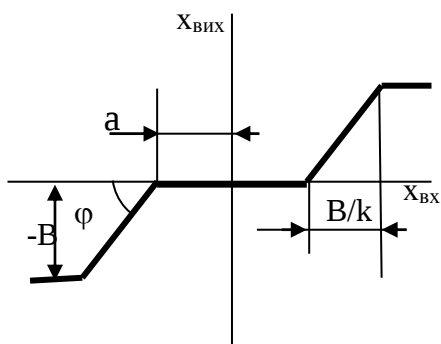


Статистична характеристика:

$$\begin{cases} x_{вих} = k x_{вх} \text{ при } |x_{вх}| \leq B/k \\ x_{вих} = B \text{ при } x_{вх} \geq B/k \\ x_{вих} = -B \text{ при } x_{вх} \leq -B/k \end{cases}$$

Приклад: мембрана чутливого елемента, електричний підсилювач.

в) *нечутливість і обмеження*.

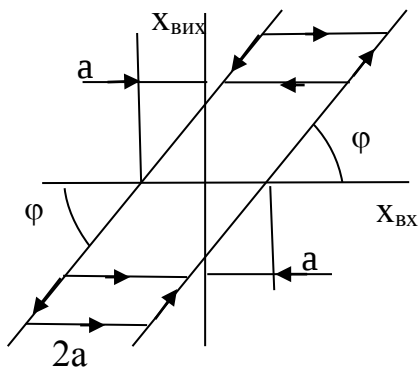


Статична характеристика:

$$\begin{cases} x_{вих} = 0 \text{ при } |x_{вх}| \leq a \\ x_{вих} = k(x_{вх} - a) \text{ при } a \leq x_{вх} \leq B/k + a \\ x_{вих} = B \text{ при } x_{вх} \geq B/k + a \\ x_{вих} = k(x_{вх} + a) \text{ при } -(B/k + a) \leq x_{вх} \leq -a \\ x_{вих} = -B \text{ при } x_{вх} \leq -(B/k + a) \end{cases}$$

Приклад: гідравлічний та пневматичний підсилювачі

г) люфт



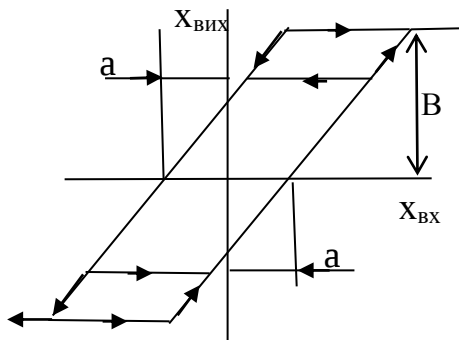
Статична характеристика:

$$\begin{cases} x_{вих} = k(x_{вх} - a) \text{ при } dx_{вх}/dt > 0 \\ \quad \text{та } kx_{вх} - x_{вих} = ka \\ x_{вих} = k(x_{вх} + a) \text{ при } dx_{вх}/dt < 0 \\ \quad \text{та } x_{вих} - kx_{вх} = ka \\ dx_{вх}/dt = 0 \text{ при } |kx_{вх} - x_{вих}| < ka \end{cases}$$

$$k = \operatorname{tg} \varphi$$

Приклад: механічні передачі з зазором.

д) люфт з обмеженням

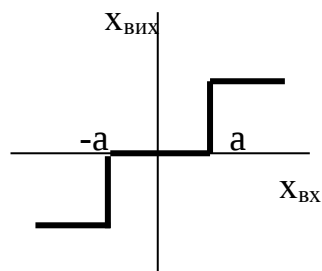


Статична характеристика:

$$\begin{cases} x_{вих} = k(x_{вх} - a) \text{ при } dx_{вх}/dt > 0, \quad kx_{вх} - x_{вих} = ka \\ \quad \text{та } -(B/k - a) \leq x_{вх} \leq B/k + a \\ x_{вих} = B \text{ при } dx_{вх}/dt > 0 \text{ та } x_{вх} \geq B/k + a \\ x_{вих} = -B \text{ при } dx_{вх}/dt > 0 \text{ та } x_{вх} \leq -(B/k - a) \\ x_{вих} = k(x_{вх} + a) \text{ при } dx_{вх}/dt < 0, \quad x_{вих} - kx_{вх} = ka \\ \quad \text{та } -(B/k + a) \leq x_{вх} \leq B/k - a \\ x_{вих} = B \text{ при } dx_{вх}/dt < 0 \text{ та } x_{вх} \geq B/k - a \\ x_{вих} = -B \text{ при } dx_{вх}/dt < 0 \text{ та } x_{вх} \leq -(B/k + a) \\ dx_{вх}/dt = 0 \text{ при } |kx_{вх} - x_{вих}| < ka \\ \quad \text{та } x_{вх} \leq |B/k + a| \end{cases}$$

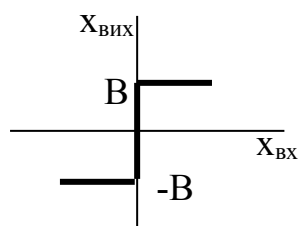
е) релейні елементи – вихідна величина може приймати лише кінцеве число значень при безперервній зміні вхідної величини:

- релейний елемент з зоною нечутливості;



$$\begin{cases} x_{вих} = 0 \text{ при } -a < x_{вх} < a \\ x_{вих} = B \text{ при } x_{вх} \geq a \\ x_{вих} = -B \text{ при } x_{вх} \leq -a \end{cases}$$

- релейний елемент без зони нечутливості;



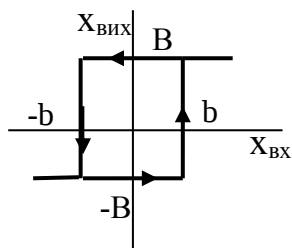
- з нейтральним положенням:

$$\begin{cases} x_{вих} = 0 \text{ при } x_{вх} = 0 \\ x_{вих} = B \text{ при } x_{вх} > 0 \\ x_{вих} = -B \text{ при } x_{вх} < 0 \end{cases}$$

- без нейтрального положення:

$$\begin{cases} x_{вих} = B \text{ при } x_{вх} \geq 0 \\ x_{вих} = -B \text{ при } x_{вх} \leq 0 \end{cases}$$

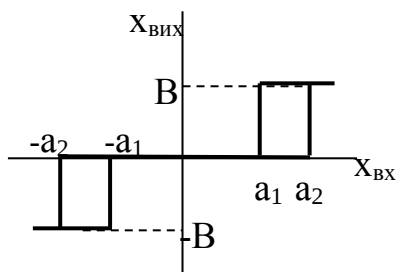
- неоднозначний релейний елемент без зони нечутливості;



$$\begin{cases} x_{вих} = B \text{ при } x_{вх} \geq b \\ x_{вих} = -B \text{ при } x_{вх} \leq -b \\ x_{вих} = B \text{ при } dx_{вх}/dt < 0 \text{ та } -b < x_{вх} < b \\ x_{вих} = -B \text{ при } dx_{вх}/dt > 0 \text{ та } -b < x_{вх} < b \end{cases}$$

Величина $2b$ визначає величину зони неоднозначності.

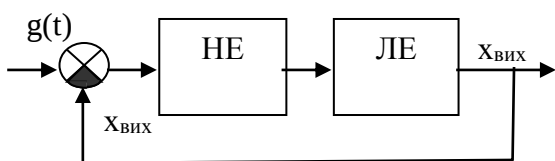
- неоднозначний релейний елемент з зоною нечутливості;



$$\begin{cases} x_{вих} = B \text{ при } x_{вх} \geq a_2 \\ x_{вих} = -B \text{ при } x_{вх} \leq -a_1 \\ x_{вих} = 0 \text{ при } -a_1 \leq x_{вх} \leq a_1 \\ x_{вих} = B \text{ при } -a_1 \leq x_{вх} \leq a_2 \text{ та } dx_{вх}/dt < 0 \\ x_{вих} = 0 \text{ при } a_1 \leq x_{вх} \leq a_2 \text{ та } dx_{вх}/dt > 0 \\ x_{вих} = -B \text{ при } -a_2 < x_{вх} < -a_1 \text{ та } dx_{вх}/dt > 0 \\ x_{вих} = 0 \text{ при } -a_2 \leq x_{вх} \leq -a_1 \text{ та } dx_{вх}/dt < 0 \end{cases}$$

2.6.2 Особливості досліджень нелінійних систем

Нелінійні системи автоматичного регулювання крім нелінійних елементів мають групи лінійних ланок. При дослідженні системи перетворюють таким чином, щоб отримати одну контурну систему послідовно з'єднаних нелінійних та лінійних елементів.



Подальші точні дослідження нелінійних систем автоматичного регулювання ускладнені, так як немає загальних методів розв'язку. На практиці користуються наближеними методами, найпоширенішими з яких є:

- метод фазової площини;
- метод припасовування;
- метод гармонічного балансу;
- метод математичного моделювання.

Метод фазової площини

Метод фазової площини використовують для дослідження нелінійних систем другого порядку. Він може бути застосованим для будь-якого типу не лінійності або їх сполучень. Перевага цього методу полягає в його наглядності

фізичної картини явища. Недоліком його є те, що метод не дозволяє судити про перехідний процес в часі.

Фазовою площиною називають площу, на якій зображена зміна якої-небудь змінної величини x в функції швидкості її зміни $y = dx/dt$.

При незатухаючих гармонійних коливаннях $x = A \sin \omega t$.

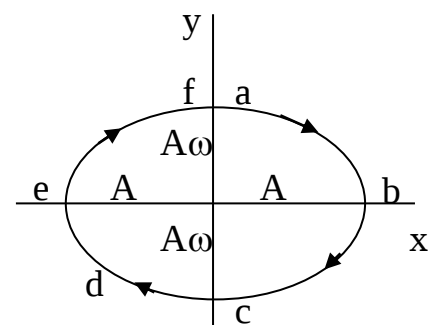
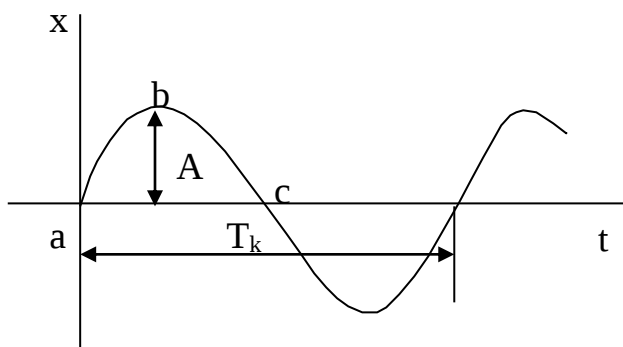
Швидкість зміни змінної x виразиться як:

$$y = \frac{dx}{dt} = A\omega \cos \omega t$$

Якщо врахувати, що $t = \arccos(x/A)$, то маємо

$$y = A\omega \cos \arcsin \frac{x}{A} = A\omega \cos \arccos \sqrt{1 - \frac{x^2}{A^2}}$$

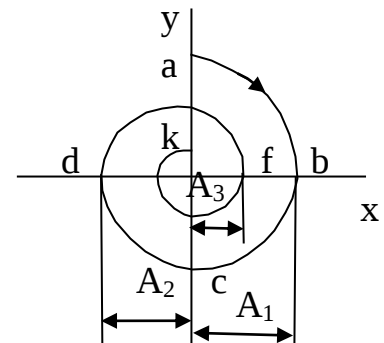
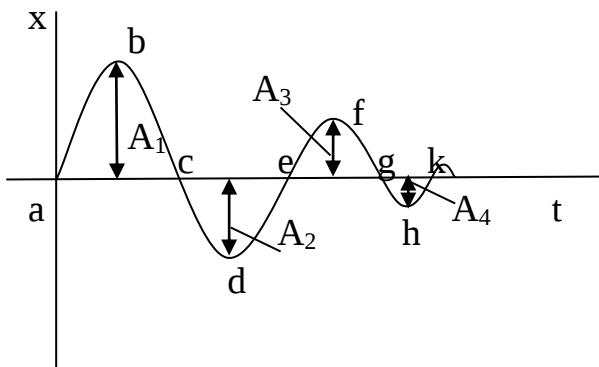
Або $\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{A^2\omega^2} = 1$, що є рівнянням еліпсу.



При зміні величини x , відповідна їй точка на фазовій площі (зображаюча точка) буде переміщуватись вдовж еліпса за годинниковою стрілкою з періодом коливань T_k .

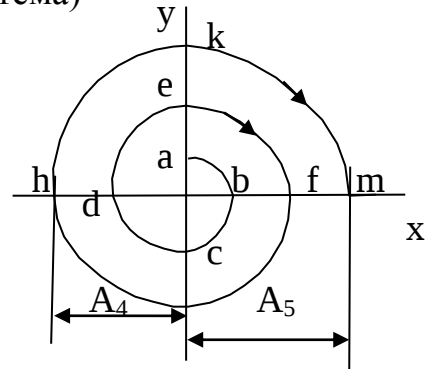
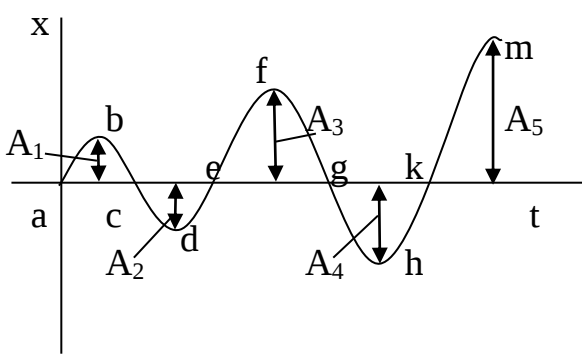
Крива руху зображаючої точки на фазовій площі називається *фазовою траєкторією*.

При затухаючих коливаннях (стійка система).



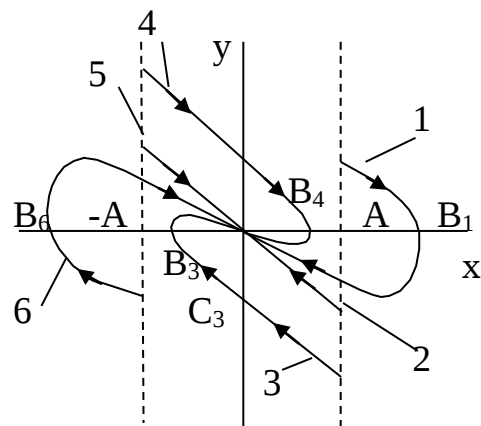
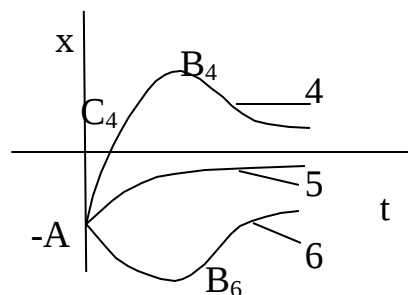
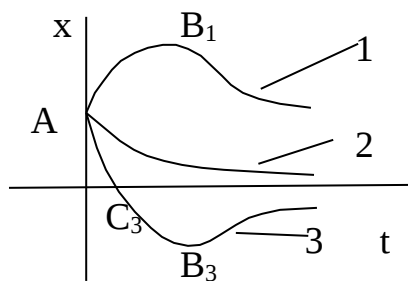
Фазова траєкторія даних коливань наближається до початку координат, так як амплітуда та швидкість зміни відхилень величини, що регулюється, поступово зменшується.

При коливаннях, що не сходяться (нестійка система)



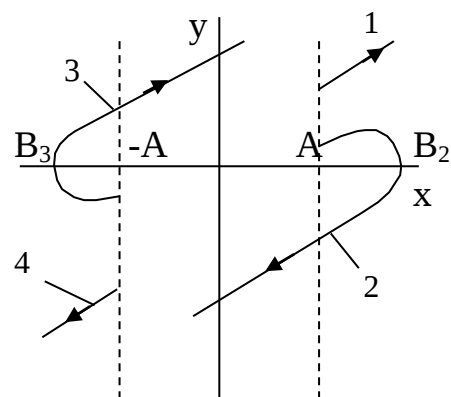
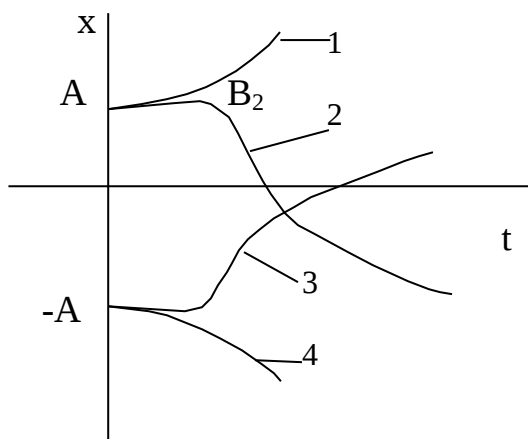
Фазова траєкторія має вигляд спіралі, що розходиться.

Стійкі системи з аперіодичними перехідними процесами.



Фазові траєкторії наближаються до початку координат.

Нестійка аперіодична система.



Фазова траєкторія віддаляється від початку координат фазової площини.

Фазова траєкторія має дві загальні характерні властивості:

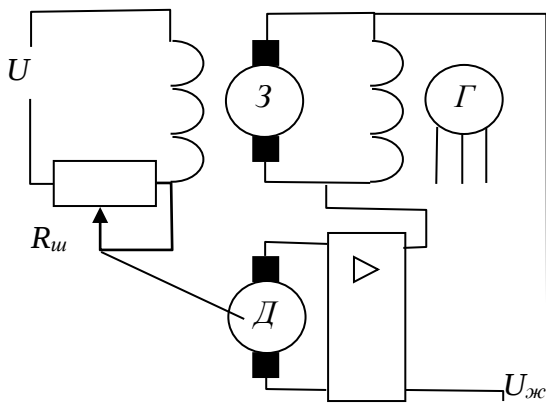
- в верхній половині фазової площини зображаюча точка завжди рухається зліва направо, а в нижній – справа наліво (в сторону зменшення x);
- фазова траєкторія пересікає вісь x завжди під прямим кутом (так як в даній точці $y=dx/dt=0$).

Метод припасовування.

В цьому методі використовується можливість розбивання перехідного процесу нелінійної системи на ділянки, які відповідають різним діапазонам зміни величини, що регулюється, причому в межах кожної з цих ділянок система може розглядатись як лінійна.

Для кожної ділянки перехідний процес описується лінійними диференціальними рівняннями. На основі умови безперервності, рішення окремих рівнянь припасовуються – тобто початкові умови наступного рівняння прирівнюються до кінцевих значень попереднього рівняння (друга назва методу – *метод зшивання*).

Приклад: Хай є система регулювання U збудження (3) трьохфазного генератора (Γ).



При відхиленні $U_{зб\gamma d}$ виникає різниця

$\Delta U_{зб\gamma d} = U_{жив} - U_{зб\gamma d}$, що подається на підсилювач, з виходу якого поступає на виконавчий двигун Δ , який пересуває движок шунтового реостата $R_{ш}$ і змінює струм збудження збудника (3).

Статична характеристика двигуна – релейна з зоною нечутливості.

Рівняння руху виконавчого двигуна:

$$dx/dt = \begin{cases} 1/T_d & \text{при } U_{нидс} > a \\ -1/T_d & \text{при } U_{нидс} < -a \\ 0 & \text{при } |U_{нидс}| < a \end{cases}$$

Рівняння підсилювача

$$U_{нидс} = k_1 \Delta U_{зб\gamma d}$$

Рівняння об'єкта керування (збудника)

$$T_{зб\gamma d} \frac{dU_{зб\gamma d}}{dt} + U_{зб\gamma d} = -k_2 x$$

де x – координата переміщення движка реостата $R_{ш}$;

T_d – стала часу двигуна;

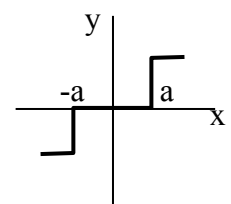
$T_{зб\gamma d}$ – стала часу кола збудження збудника;

k_1 – коефіцієнт підсилення підсилювача;

k_2 – коефіцієнт підсилення збудника.

Сумісно вирішити ці три рівняння, то знайдемо фазову траєкторію:

$$\begin{cases} \frac{d(\Delta U'_{зб\gamma d})}{d(\Delta U_{зб\gamma d})} = \frac{1}{T_{зб\gamma d}} - \frac{k_2}{T_{зб\gamma d} T_d \Delta U'_{зб\gamma d}} & \text{для } \Delta U_{зб\gamma d} > \frac{a}{k_1} \\ \frac{d(\Delta U'_{зб\gamma d})}{d(\Delta U_{зб\gamma d})} = -\frac{1}{T_{зб\gamma d}} + \frac{k_2}{T_{зб\gamma d} T_d \Delta U'_{зб\gamma d}} & \text{для } \Delta U_{зб\gamma d} < -\frac{a}{k_1} \\ \frac{d(\Delta U'_{зб\gamma d})}{d(\Delta U_{зб\gamma d})} = -\frac{1}{T_{зб\gamma d}} & \text{для } |\Delta U_{зб\gamma d}| < \frac{a}{k_1} \end{cases}$$



де $\Delta U'_{зб\gamma\delta} = \frac{d(\Delta U_{зб\gamma\delta})}{dt}$ - швидкість зміни відхилення напруги збудника.

Кожне рівняння справедливе тільки для певних значень $\Delta U_{зб\gamma\delta}$

Після інтегрування отримаємо для кожної області значення $\Delta U_{зб\gamma\delta}$ фазової траєкторії:

- для області I:

$$\Delta U_{зб\gamma\delta} = \frac{k_2^2 T_{зб\gamma\delta}}{T_\delta} \ln \left(1 + \frac{T_\delta \Delta U'_{зб\gamma\delta}}{k_2} \right) - k_2 T_{зб\gamma\delta} + c$$

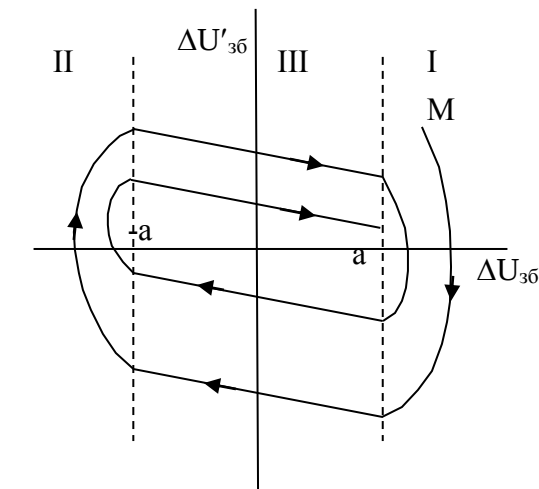
- для області II:

$$\Delta U_{зб\gamma\delta} = -\frac{k_2^2 T_{зб\gamma\delta}}{T_\delta} \ln \left(1 - \frac{T_\delta \Delta U'_{зб\gamma\delta}}{k_2} \right) - k_2 T_{зб\gamma\delta} + c$$

- для області III:

$$\Delta U'_{зб\gamma\delta} = -T_{зб\gamma\delta} \Delta U_{зб\gamma\delta} + c$$

Фазова траєкторія починається в точці М (координати визначаються за початковими умовами – с).



На межах зон проходить „припасовування” (зшивання) кінцевих значень попередньої ділянки з початком наступної.

Якщо фазова траєкторія йде до початку координат – лінійна система стійка. Якщо зображаюча точка попаде в початок координат – настає рівновага. Якщо фазова траєкторія почне розходитись – нестійка система. Якщо фазова траєкторія вийде замкненою, то в системі здійснюються автоколивання.

Метод гармонійного балансу

Метод базується на порівнянні вхідного гармонійного коливання та першої гармоніки на виході нелінійного елементу. Він є наближеним методом дослідження нелінійних систем будь-якого порядку, так як не враховує вплив вищих гармонік. Вважається, що кожна лінійна ланка в нелінійній системі являє собою низькочастотний фільтр, який подавляє високочастотні складові, що породжуються нелінійними елементами системи.

Користуючись методом гармонійного балансу, нелінійні ланки замінюються еквівалентними лінійними з параметрами, що залежать від частоти та амплітуди гармонійного вхідного коливання. Така заміна носить назву *гармонійної лінеаризації* нелінійних ланок.

Хай на вхід подається сигнал $x_{вх} = a \sin \omega t$,

То на виході з'явиться сигнал прямокутної форми, що розкладається в ряд Фур'є:

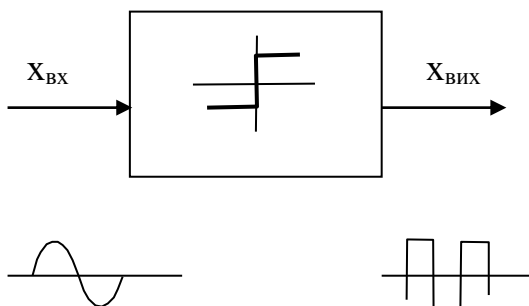
$$x_{вих} = A_1 \sin \omega t + A_3 \sin 3\omega t + A_5 \sin 5\omega t + \dots$$

Вищі гармонійні складові становлять незначну частину і ними нехтують:

$$x_{вих} = A_1 \sin \omega t$$

$$\text{Тоді } W_n(p) = \frac{x_{вих}}{x_{вх}} = \frac{A_1}{a} = q$$

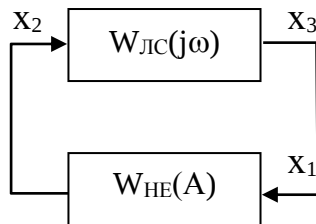
де q – коефіцієнт гармонійної лінеаризації.



(для кожного типу нелінійностей він наводиться в довідниковій літературі)

Даний метод має особливе велике значення при дослідженнях автоколивань в нелінійних системах і визначенні умови стійкості таких систем.

Уявимо нелінійну систему як з'єднання лінійного та нелінійного елементів.



Амплітуднофазова частотна характеристика нелінійного елемента в загальному вигляді становить:

$$W_{не}(j\omega) = q(A) + jb(A)$$

Амплітуднофазова частотна характеристика лінійної частини:

$$W_{лч}(j\omega) = \frac{\overset{\rightarrow}{x_3}}{\overset{\rightarrow}{x_2}}, \text{ а нелінійної}$$

$$W_{не}(j\omega) = \frac{\overset{\rightarrow}{x_2}}{\overset{\rightarrow}{x_1}}$$

Якщо їх перемножити та врахувати, що $x_1 = -x_3$, знайдемо рівняння автоколивань в системі:

$$W_{лч}(j\omega) \cdot W_{не}(A) + 1 = 0$$

Умова виникнення автоколивань: амплітуди перетворених сигналів повинні бути зворотні за величиною, а зсуви фаз – зворотні за направленням.

Якщо прирівняти окремо дійсну та уявну частини до нуля, то отримаємо два рівняння з невідомими A та ω . При вирішенні та отриманні дійсних значень для ω , то це вказує, що в нелінійній системі можливі автоколивання.

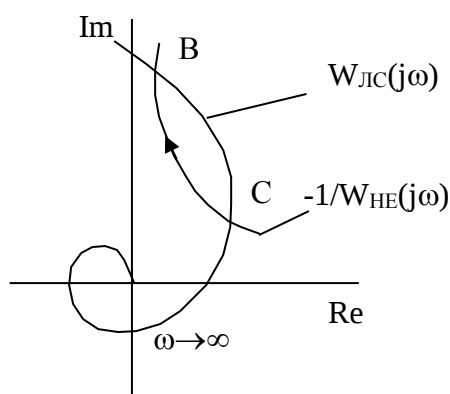
Рівняння умови автоколивань простіше вирішити графічно:

$$W_{лч}(j\omega) = -\frac{1}{W_{не}(A)}$$

Якщо годографи систем не пересікаються, то автоколивання в системі не виникають.

Якщо вони дотикаються – система на межі стійкості.

При пересіченні – система нестійка – точка пересічення визначає частоту та амплітуду можливих коливань.



Автоколивання можуть бути стійкими та нестійкими. Стійкими вони будуть тоді, коли зображаюча точка переміщується за кривою $(-1/W_{не}(A))$ в напрямку зростання A і приходить до точки пересічення з серединою характеристики $(W_{лч}(j\omega))$. Тобто в точці B система знаходиться в режимі стійких автоколивань, а в точці C – в режимі нестійких автоколивань.

Метод математичного моделювання

Моделювання поділяється на:

- *фізичне* – процеси, що проходять в оригіналі імітуються на моделі з однаковою фізичною природою. При фізичному моделюванні треба створювати кожний раз нову модель, що здорожує дослідження та ускладнює варіацію параметрів моделі в широкому діапазоні;
- *математичне* – здійснюється на аналогії рівнянь статички та динаміки, які описують процеси, що проходять в реальних об'єктах та моделі, причому кожному елементу оригіналу відповідає свій фізичний елемент моделі.

3.0 ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ТА ЕЛЕМЕНТИ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ

Засоби систем автоматики включають прилади та технічні пристрої, що виконують функції отримання, передачі та перетворення контрольної інформації, формування командної інформації та використання її дії на технологічний процес.

За функціональними ознаками засоби систем автоматики поділяють на групи:

1. Отримання інформації про стан технологічного процесу . До них відносять вимірювальні, нормуючі перетворювачі, які використовуються для контролю процесу, що керується.

2. Приймання, перетворення та передачі інформації за каналом зв'язку. До них відносять пристрої для передачі інформації на відстань (пристрої телемеханіки).

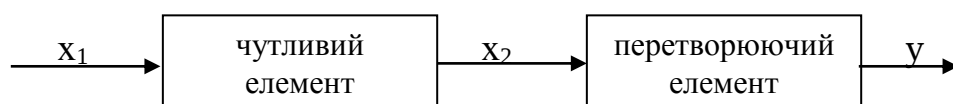
3. Перетворення, зберігання та обробки інформації, формування команд керування, зв'язку з оперативним персоналом. До них відносять функціональні перетворювачі, логічні пристрої, реле, програмні пристрої, регулятори, за датчики, обчислювальні пристрої та комплекси.

4. Використання командної інформації для дії на об'єкт, що керується. До них відносять виконавчі пристрої з підсилювачами, пристрої відображення інформації.

3.1 Датчики

Датчик – пристрій, який призначений для перетворення інформації, що поступає на його вхід у вигляді деякої фізичної величини, в іншу функціональну величину, для подальшого використання в елементах автоматичних систем.

Датчики складаються з чутливого та перетворюючого елементів (або тільки з чутливого елемента).



Датчики перетворюють неелектричну величину x в електричну або електричну в електричну, або неелектричну в неелектричну. За родом енергії вихідної величини датчики поділяються на:

- *електричні*;
- *неелектричні*.

Електричні датчики за принципом дії поділяються на:

- *параметричні* (реагують на фізичний параметр) – до них відносять: контактні, реостатні, потенціометричні, тензодатчики, терморезистори, ємкісні, індуктивні, електронні, фоторезисторні та ін. Вимагають застосування додаткового джерела живлення;

- *генераторні* (виробляють фізичний сигнал) - до них відносять: термоелектричні (термопари), індукційні, п'єзоелектричні, вентильні фотоелементи та ін. Їм не потрібне додаткове джерело живлення.

Неелектричні поділяються на механічні, пневматичні, гідравлічні та ін.

За точністю датчики повинні відповідати класам:

0,25; 0,4; 0,6; 1,0; 1,5; 2,5 та 4,0

Датчики класифікуються за різними ознаками, але перед усім за видом величини, що вимірюється, та принципом дії.

№ п/п	Величина, що вимірюється	Тип датчика													
		неелектричні		електричні											
		механічні	гідравлічні (пневматичні)	потенціометр.	тензометричн.	індуктивні	терморезисторні	ємкісні	фоторезисторні	електронні	індукційні	П'єзоелектричні	термоелектричні	датчики Холла	Фотоелектричні
1	Переміщення	+	+	+	+	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+
2	Рівень	+	+	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	Швидкість	+	+	-	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	+
4	Прискорення	+	-	-	+	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-
5	Сила	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	+	-
6	Тиск	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
7	Момент	-	+	+	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-	+
8	Вологість	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	+	-	-
9	Температура	-	-	-	-	+	+	-	+	-	-	-	+	-	+
10	Витрати речовини	-	+	+	+	+	-	-	+	-	+	-	-	-	-
11	Вібрація	-	-	+	+	+	-	+	-	-	+	+	-	+	-

+ - застосовується;

- - не застосовується.

Основні характеристики датчиків.

1. Статична характеристика – залежність вихідної величини від вхідної $y=f(x)$.
2. Чутливість (коефіцієнт перетворення) – відношення вихідної величини до вхідної величини:
 $k = y/x$ – для датчиків з лінійною статичною характеристикою;
 $k=dy/dx$ – для датчиків з нелінійною характеристикою (диференціальна чутливість).
3. Межа чутливості – мінімальна величина на вході датчика, що викликає зміну його вихідної величини. (Залежить від внутрішніх та зовнішніх факторів – тертя, люфту, гістерезису, перешкод).
4. Похибка:
 - абсолютна – різниця між дійсним значенням вихідної величини та розрахунковим значенням ($\Delta y = y' - y$);
 - відносна - $\delta = \Delta y \cdot 100\%/y$.
5. Динамічна характеристика залежність вихідної величини від вхідної в перехідний період.
6. Вихідна потужність.
7. Вихідний опір.

3.1.1 Неелектричні датчики

а) механічні датчики

Чутливий елемент таких датчиків знаходиться в стані силового замикання з джерелом інформації. До них відносять: щупи, стержні, полозки, котки та ін.

Проміжний вид даного типу датчиків є механічні датчики з контактом (механічний чутливий елемент діє на електричний контакт).

б) гідравлічні та пневматичні датчики

Перетворюють величини різної фізичної природи, що контролюються та керуються, в сигнали, які змінюють гідравлічний або пневматичний стан робочої речовини датчика.

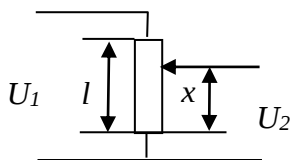
Чутливим елементом в них є еластичні або пружні мембрани (дають можливість вимірювати тиск $10^4 \dots 10^8$ Па), сильфони (працюють в основному на стискання – діапазон вимірювання $0,1 \dots 10^5$ кПа), трубчасті пружини, поплавки, термометричні балони та діафрагми.

Поплавкові датчики використовують для вимірювання витрат рідини (ротаметри).

3.1.2 Електричні датчики

а) потенціометричні датчики

Використовуються для перетворення лінійного (x) або кутового (φ) переміщення (вхідна величина) в електричний сигнал постійного або змінного струму (вихідна величина).



Конструктивно складаються з каркасу (прямокутного або кругового) обмотки (константан, манганін, ізабелін, нікелін) та движка.

$$U_2 = IR_x = U_1 R_x / R_n = U_1 x / l = kx$$

В системах автоматики також застосовуються непроволочні (плівкові) потенціометри – плівка з благородного металу (родія) нанесена на склі.

б) тензометричні датчики

Використовують для вимірювання переміщень – деформації деталей. Принцип дії базується на явищі тензоефекту – зміни величини активного опору провідникового або напівпровідникового матеріалу під дією прикладених до них механічних напружень. Основна їх характеристика – коефіцієнт тензочутливості – відношення зміни опору до зміни деформації:

$$k = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l}$$

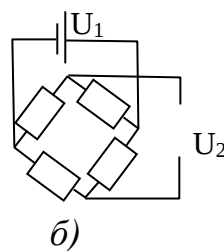
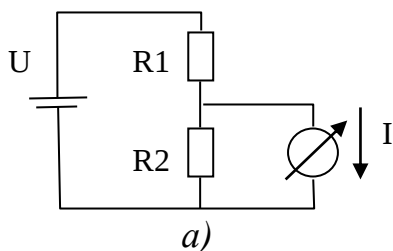
у провідникових - $k \approx 2$, у напівпровідникових - $k \approx 100$.

Тензорезистори поділяють на :

- проволочні на паперовій і плівковій основі;
- фольгові прямокутні та розеточні;
- напівпровідникові.

Для проволочених допустимий струм складає 30 мА, а для фольгових – 0,5А. Максимальна відносна деформація не перевищує 0,3%.

При вимірюваннях вмикають за потенціометричною (а) або мостовою (б) схемами.



Використовують при вимірюваннях зусиль, тиску, моменту.

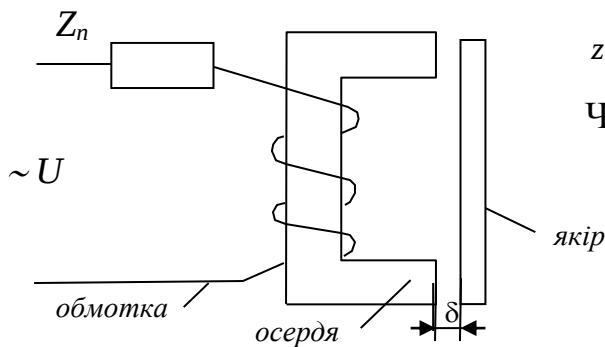
в) електромагнітні датчики

Принцип дії оснований на зміні індуктивності (L) магнітної системи під дією вхідною величини (переміщення, деформації, рівня, тиску і т.д.)

За видом перетворення електромагнітні датчики поділяються на:

- індуктивні;
- трансформаторні;
- магніто пружні;
- індукційні.

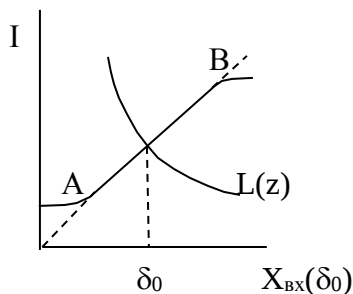
1. Індуктивні датчики – перетворюють зміну керованої величини в зміну індуктивного опору обмотки.



$$z = \sqrt{R_a^2 + x_L^2}$$

$$\text{Чутливість } \gamma = \frac{\Delta z/z}{\Delta \delta/\delta}$$

Статична характеристика має згини (точки А та В). На практиці δ_0 вибирають в середині АВ.



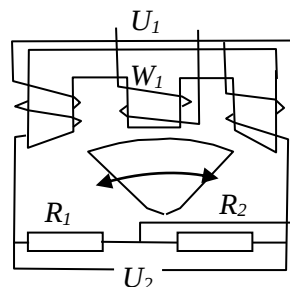
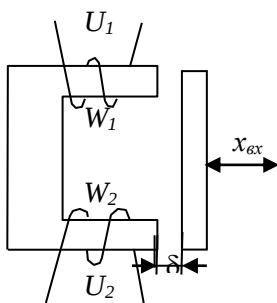
Для плоских пристроїв вхідне переміщення допускається 0,01...5 мм, а для соленоїдних від 3 до 100 мм.

Індуктивні датчики можуть виконуватись нереверсивними і реверсивними (два послідовно з'єднаних нереверсивних).

2. Трансформаторні

В основі роботи лежить залежність зміни взаємної індуктивності обмоток (W_1 і W_2) при переміщенні одної відносно другої або при переміщенні якоря датчика. Ці датчики генераторні і поділяються на:

- датчики з якорем, що переміщується або повертається



- датчики з поворотною (обмотка закріплена на поворотній рамці) або з обмоткою, яка переміщується (обмотка знаходиться на якорі).

Чутливість трансформаторних датчиків -0,5...3 мВ/мк на 1В первинної напруги.

Для виміру кутових переміщень виконують у вигляді електромашин – обертові трансформатори, сельсини – у яких первинна обмотка розташовується на статорі, а вторинна – на роторі.

5. Магніто пружні датчики

Використовують зміну магнітної проникливості феромагнітних тіл, які підлягають дії сил або температур. Чутливість $k = \frac{\Delta\mu/\mu}{\Delta l/l}$ (зміна магнітної проникливості від зміни лінійних розмірів). Для пермалоя $k \approx 200 \dots 300$

Недоліком даних датчиків є залежність властивостей від температури та не лінійність характеристики магнітної проникливості від прикладеної сили.

4. Індукційні датчики (генераторні)

Основа на явищі електромагнітної індукції – наведення е.р.с. в електроконтурі, в якому змінюється магнітний потік. До них відносять тахогенератори постійного та змінного струму.

г) електронні датчики

Перетворюють механічну величину в електричний сигнал і являють собою лампу, окремі електроди якої під дією зовнішніх сил можуть переміщуватися відносно один одного.

д) ємкісні датчики

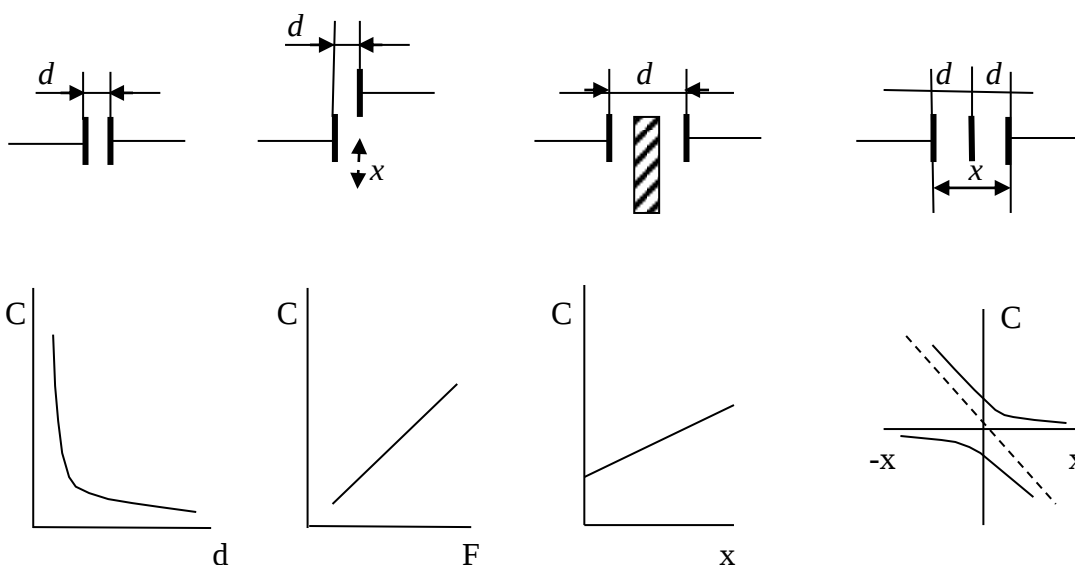
Зміна входної величини викликає зміну ємкості конденсатора. Ємкість плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{d} F$$

де ε_0 – діелектрична проникливість вакууму (повітря);

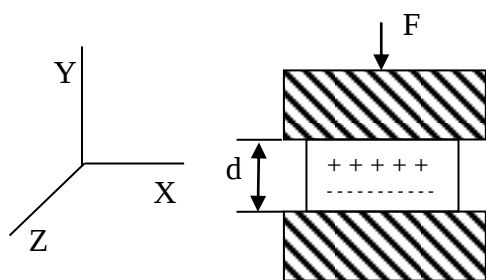
F – площа пластин;

d – величина зазору.



є) п'єзоелектричні датчики

Дія основана на явищі п'єзоефекту, суть якого полягає в тому, що під дією прикладених зусиль на гранях деяких кристалів (кварц, титан, турмалін, сегнетова сіль та ін.) з'являється електричний заряд (прямий п'єзоефект). При внесенні п'єзоелементу в електричне поле він деформується (обернений п'єзоефект).



$$U_{вих} = \frac{Q_x d}{\epsilon f_x} \quad (\text{без врахування ємності}$$

вимірювальної схеми)

де Q_x – кількість зарядів на п'єзовісі (вісь X);

f_x – площа грані перпендикулярної до вісі x;

ϵ – діелектрична проникливість матеріалу пластини;

d – товщина пластини.

Якщо сила (F) діє вздовж x вісі, то виникає повздовж ний ефект; вздовж Y (механічна вісь) – поперечний ефект; вздовж Z (оптична вісь) – ефект відсутній.

Якщо сила (F) діє постійно, то проходить стікання зарядів і вихідна напруга змінюється за експоненціальним законом. Тому п'єзоелементи застосовуються в основному для вимірювання зусиль, що змінюються з частотою $> 15 \text{ кГц}$.

Чутливість визначається як:

$$k = \frac{k_0}{c_n + c_n}$$

де c_n , c_n – ємності п'єзоелементу та навантаження.

Так як вихідна напруга невелика п'єзоелементи використовуються з підсилювачами.

ж) фотоелектричні датчики

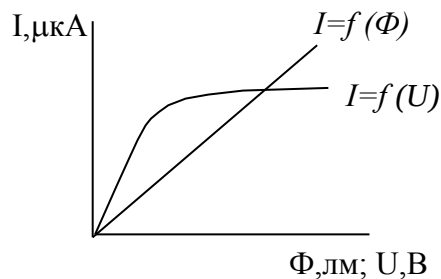
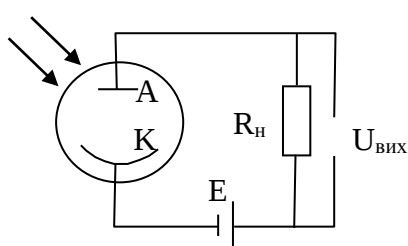
Перетворюють світловий потік в електричний сигнал. Випускають трьох видів:

- з зовнішнім фотоефектом (вакуумні або газонаповнені);
- з внутрішнім фотоефектом (фоторезистори);
- вентильні (напівпровідникові).

Основні характеристики:

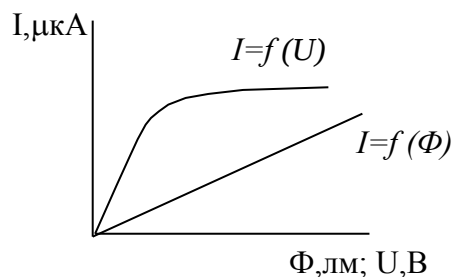
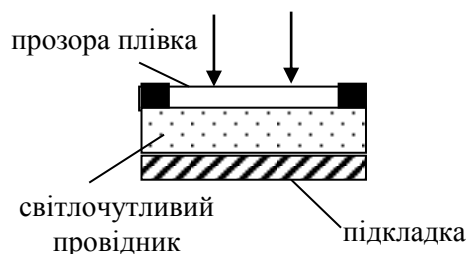
- світлова (залежність фотоструму від освітленості – $I=f(\Phi)$);
- спектральна (залежність чутливості від довжини хвилі променів, що падають – $S_\lambda=f(\lambda)$);
- вольт-амперна (залежність фотоструму від величини напруги, що прикладається до фотоелементу – $I=f(U)$);
- частотна (залежність чутливості від частоти зміни світлового потоку).

1. Фотоелементи з зовнішнім фотоефектом



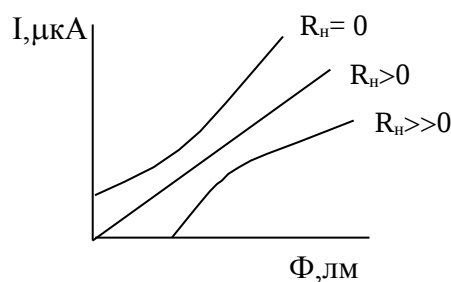
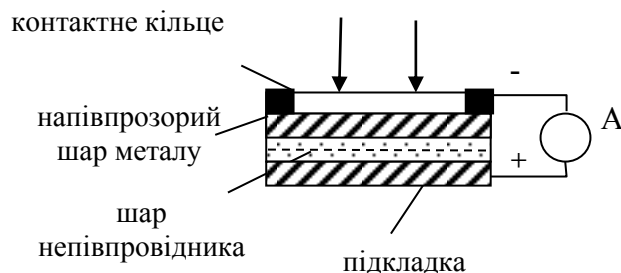
Конструкційно являє собою лампу, на внутрішній стінці якої нанесений фоточутливий шар (катод). Під дією світла виникають вільні електрони, які під дією електрополя переміщуються до аноду і виникає струм. Інтегральна чутливість – до 100мкА/мм. ($k=dI/d\Phi$).

2. Фотоелементи з внутрішнім фотоефектом



Вільні електрони під дією світлового потоку в шарі світлочутливого провідника перерозподіляються в ньому різко змінюючи його опір. Чутливість даних датчиків – до 600 мкА/В мм.

2. Фотоелементи з вентильним фотоефектом



Використовують явище, що проходить в n - p переході під дією світлового потоку. Чутливість досягає 20 мА/лм у фотодіодів, і до 1А/лм у фототранзисторів.

Недоліками оптичних перетворювачів є залежність від зовнішніх факторів, нестабільність характеристик фотоелементів.

3) радіотехнічні та ультразвукові датчики

Використовують там, де можливі безпосередні виміри або контроль величини, що вимірюється. Недолік – залежність від однорідності середовища, параметри якого вимірюються.

i) датчики температури

Бувають з механічним вихідним сигналом (*тепломеханічні*) та з електричним вихідним сигналом (*теплоелектричні*).

1. Тепломеханічні (термобіметалеві, дилатометричні)

Використовуються як елементи систем автоматики, які перетворюють зміну фактичного значення температури, що вимірюється, в переміщення.

Термобіметалевий датчик являє собою вузьку пластину з біметалу (зварені між собою дві пластинки металу з різними коефіцієнтами розширення), один кінець якої закріплений нерухомо.

Переміщення складає:

$$x_{\text{вих}} = k_i \frac{l^2}{\delta} T_{\text{вх}}$$

де k_i - коефіцієнт пропорційності, що залежить від властивостей матеріалу та товщини біметалевої пластини;

l – довжина пластин ($l \gg \delta$);

δ - товщина пластин.

(Приклад: при $\delta = 1 \text{ мм}$ $l = 100 \text{ мм}$ вільний кінець переміщається на 0,1...0,15 мм на 1°C зміни температури)

До тепломеханічних відносять *газонаповнені балони (манометричні)*. Заповненням служить азот, гелій. У рідинних балонах – заповненням є ртуть, ацетон, ефір, спирт.

В *дилатометричних* датчиках стержень із металу з малим коефіцієнтом температурного розширення розташований в середині трубки, що виготовлена із металу з більшим коефіцієнтом теплового розширення, і одним кінцем жорстко до неї прикріплений. При зміні температури, трубка змінює свою довжину і переміщує стержень.

Термобіметалеві та дилатометричні датчики використовуються для вимірювання температури в діапазоні $-60 + 450^\circ\text{C}$. Похибка 1...5%.

2. Теплоелектричні датчики (металеві та напівпровідникові терморезистори, термопари, напівпровідникові діоди та тріоди)

Перетворюють фактичне значення температури перетворюють в зміну електричного опору, напруги, струму.

Металеві терморезистори виготовляють з чистих металів (платина, мідь, нікель, залізо, вольфрам). Залежність опору від температури визначається як:

$$R_t = c e^{(273+\theta)\alpha_T}$$

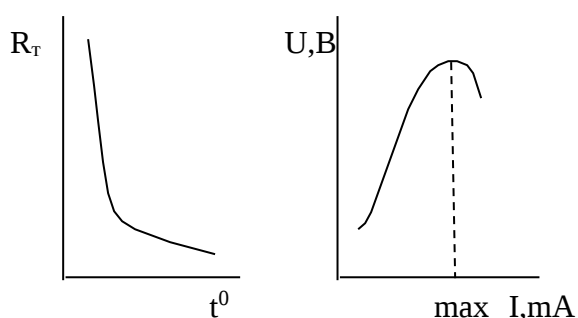
де α_T – температурний коефіцієнт опору;

c – коефіцієнт, значення якого залежать від виду матеріала.

Похибка вимірювання металевих терморезисторів складає менше 0,5...1%.

Напівпровідникові терморезистори

-термістор

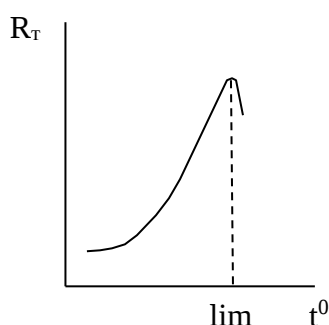


Діапазон температур 203...523 °K

Чутливість – в 5...30 раз вища металевих терморезисторів

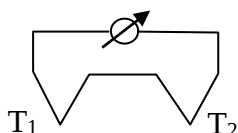
Недолік – нелінійна характеристика, погана взаємозамінність (розкид номінальних параметрів)

- позистори



В області від'ємних температур опір позистора зменшується. Додатній температурний коефіцієнт у них в 3...4 рази більший ніж у термісторів, а стала часу – в 5...6 раз менша. З ростом прикладеної напруги зменшується опір (варисторний ефект).

- напівпровідникові діоди забезпечують чутливість 0,4 В/°C, а тріоди – 2,2 мВ/°C.
- термопари – спай з двох різнорідних металів або напівпровідників.



При $T_1 > T_2$ виникає термоелектрорушійна сила. Діапазон температур 373...3000 °K.

Чутливість – 0,01...0,07 мВ на 1 °C. Похибка – до 5%. Недоліки – не терплять проміжних з'єднань (необхідно застосовувати схеми термокомпенсації), мають невисоку чутливість.

к) датчики вологості

Методи вимірювання вологості:

- *прямі* – розподіляють речовини на вологу та сухий залишок. До них відносять *термогравіметричний* (висушування проб), *дистиляційний* (матеріал нагрівають з речовиною, що не поглинає воду. Далі проводять відгонку, охолодження, вимірювання води та матеріалу.), *екстракційний* (застосовують рідини, що реагують з водою. Застосовують при інфрачервоній спектроскопії), *метод Фішера* (застосовують реактори Фішера).
- *непрямі* – вологість визначають за фізичними властивостями або величинами функціонально пов'язаних з вологістю. До них відносять *кондуктометричний* (оснований на зміні електричного опору від вологості. Має обмежене застосування), *дієлькометричний*

(вимірюється діелектрична проникливість, $\text{tg}\delta$ в діапазоні від звукових до надвисоких частот), *надвисокочастотний* (базується на зміні параметрів хвиль, що пройшли вологий матеріал. Має високу чутливість та великий діапазон вимірювання), *нейтронний* (ізотопний – затримка ядрами водню швидких нейтронів), *рентгенівський* (поглинання x -променів), *ядерно-магнітного резонансу* (поглинання радіочастотних хвиль), *оптичний* (поглинання інфрачервоних променів).

Типи датчиків:

1. *Гігрометричні* (гігроскопічні) датчики – використовують властивість деяких тіл деформуватися при поглинанні вологи з навколишнього середовища (капрон, віскоза, обезжирене волосся).
2. *Психрометричні* датчики – мають два термометри: сухий і зволожений (величини вологості визначається за різницею показів термометрів згідно таблиці)
3. *Гігрозистори* (гігристи) – резистори виготовлені з матеріалів (хлорлітій, калій-натрій, напівпровідників), опір яких різко падає при збільшенні вологості. При підвищенні вологості з 35...40%% до 95...100%% опір зменшується від 10^7 до 10^2 Ом. Похибка не перевищує 2%.

3.2 Пристрої задавання, порівняння та засоби відображення інформації

3.2.1 Пристрої задавання систем автоматики призначені для установки заданого значення керованої величини або потрібного закону її зміни.

Пристрої порівняння систем автоматики порівнюють фактичне значення керованої величини з заданим значенням і при їх розбіжності видає первинний сигнал в систему керування з метою усунення величини розбіжності.

Пристрої задавання, порівняння на схемах зображують сумісно.

Пристрої порівняння в залежності від фізичної природи датчика та сигналу, що задає керування поділяються на :

- *механічні* (важелі, диференціали);
- *електричні* (мостові, схеми на магнітних підсилювачах, схеми на напівпровідниковій основі);
- *електромеханічні* (сельсини, електромагнітні пристрої);
- *гідравлічні та пневматичні* (діафрагми, дроселі, струменеві трубки).

Порівнюючі та задаючі пристрої за видом сигналу, що виробляється, поділяються на:

- *аналогові* (безперервні та дискретні);
- *цифрові*.

При аналоговому безперервному сигналі задане значення встановлюється вручну або від програмного пристрою.

При застосуванні дискретного порівняння використовують два принципи:

- за абсолютним значенням (порівнюється діюче значення гармонійної або постійної величини);

- за фазою (для гармонійної величини одної частоти).

Аналогові та цифрові порівнювачі та задавачі пристрої використовують в обчислювальних пристроях систем автоматики.

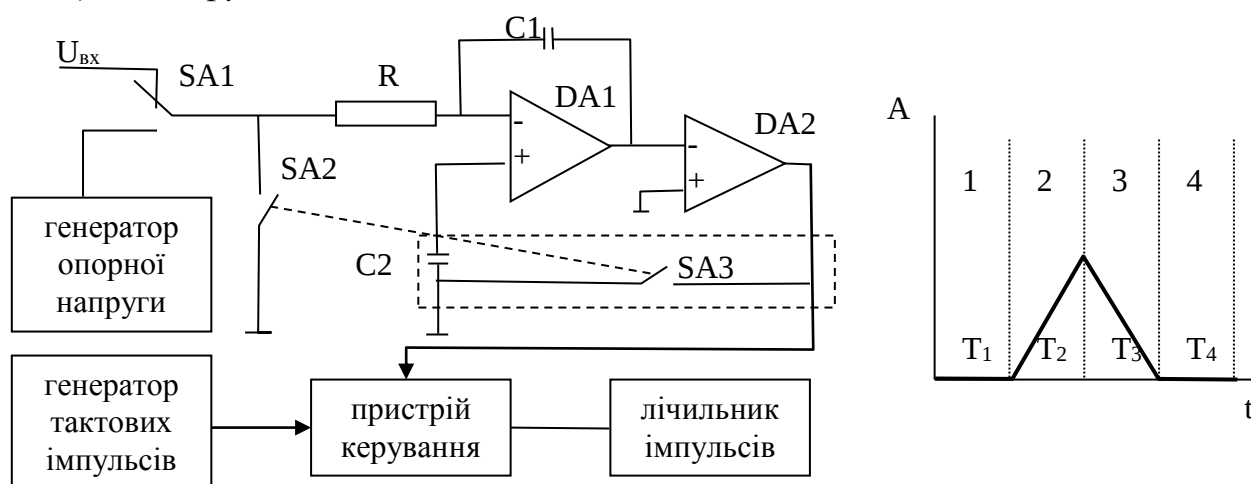
3.2.2 Аналогово - цифрові перетворювачі.

В більшості систем керування інформація від датчиків поступає в аналоговій формі. Для її обробки застосовують цифрові обчислюючі пристрої. Аналогово-цифрові перетворювачі виконують перетворення вхідної напруги або струму в двійковий або в двійково - десятковий код паралельного або послідовного виду.

Заміна безперервної величини, що вимірюється, низкою її миттєвих значень через певні проміжки часу Δt називається *квантуванням за часом*. Інтервал Δt називається *кроком квантування*, а частота перетворення $f=1/\Delta t$ – *частотою квантування*. При цьому крок квантування поділяється на дві частини: в першій – аналогова величина перетворюється в цифрову, в другій – записується в регістр та зчитується з регістру, де проходить обробка інформації про вхідну величину, результат якої – дія на об'єкт керування.

Найбільш поширеними способами аналогово-цифрового перетворення є:

а) з інтегруванням:



Робочий цикл має три періоди:

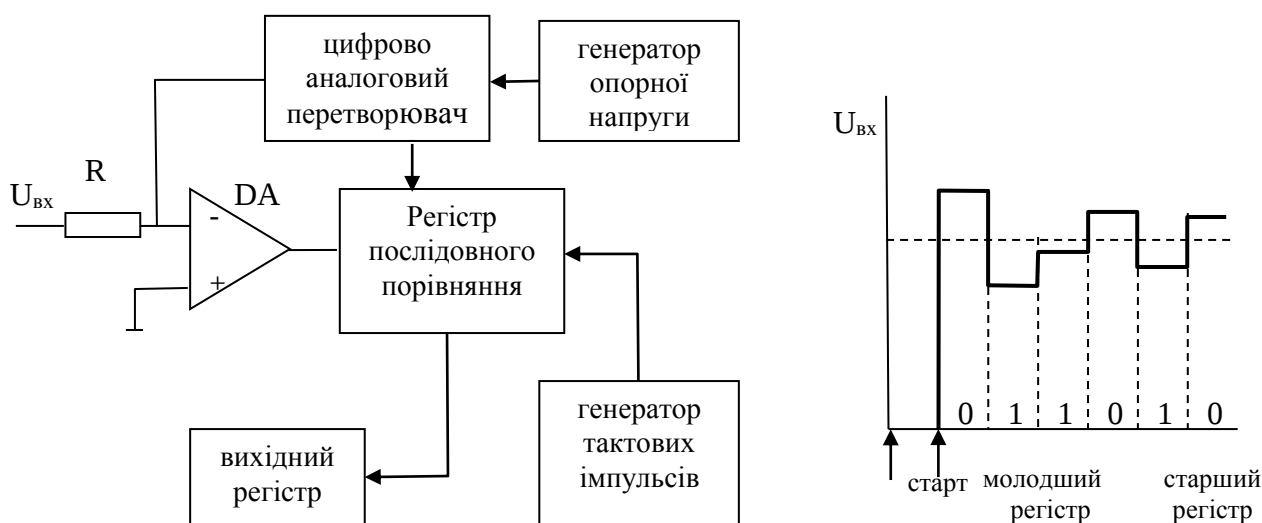
- корекція нуля – SA2 замикається на корпус – утворюється петля зворотного зв'язку і інформація про похибку запам'ятовується на C2;
- інтегрування вхідного сигналу та одночасний відлік деякого постійного числа тактових імпульсів. В кінці періоду на інтеграторі DA1 виникає напруга, що пропорційна значенню вхідного сигналу;
- інтегрування опорної напруги - на вході DA1 замість вхідного сигналу подається опорна напруга протилежної полярності. Вихідна напруга інтегратора починає падати і одночасно проводиться облік тактових імпульсів.

імпульсів. Зміна напруги проходить до рівня порівняння компаратора DA2.

Якщо T_2 тривалість першого інтервалу інтегрування, а T_3 – тривалість другого інтервалу інтегрування, що вимірюються шляхом обліку тактових імпульсів, то цифрові значення вхідного сигналу складуть:

$$U_{\text{вх}} = \frac{T_3}{T_2} U_{\text{он}}$$

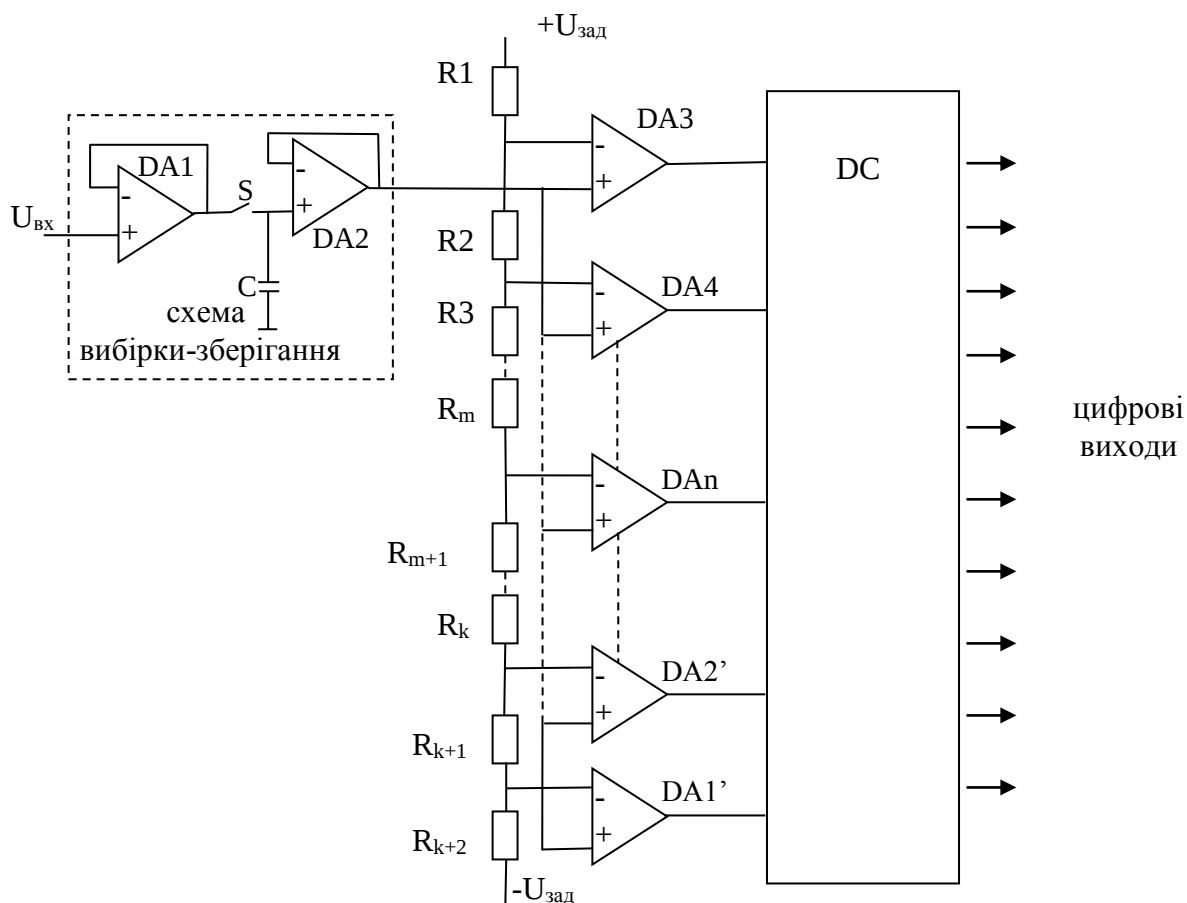
б) *аналогово-цифрові перетворювачі з послідовним порівнянням (з порозрядним урівноваженням)*



Цей перетворювач містить регістр послідовного порівняння, цифро-аналоговий перетворювач і компаратор DA , що порівнює вхідну напругу з аналоговою напругою на вході цифро-аналогового перетворювача. Якщо вхідна напруга від датчика менше вхідної напруги цифро-аналогового перетворювача, логічна „1” розряду, що обробляється, зберігається. Якщо вхідна напруга більше вхідної напруги цифро-аналогового перетворювача, то в поточному розряді встановлюється логічний „0”. Обробка наступних розрядів в регістрі проходить аналогічно. Вихідний цифровий код після оброблення всіх розрядів знімається з вихідного регістру.

в) *аналого-цифровий перетворювач паралельного типу*

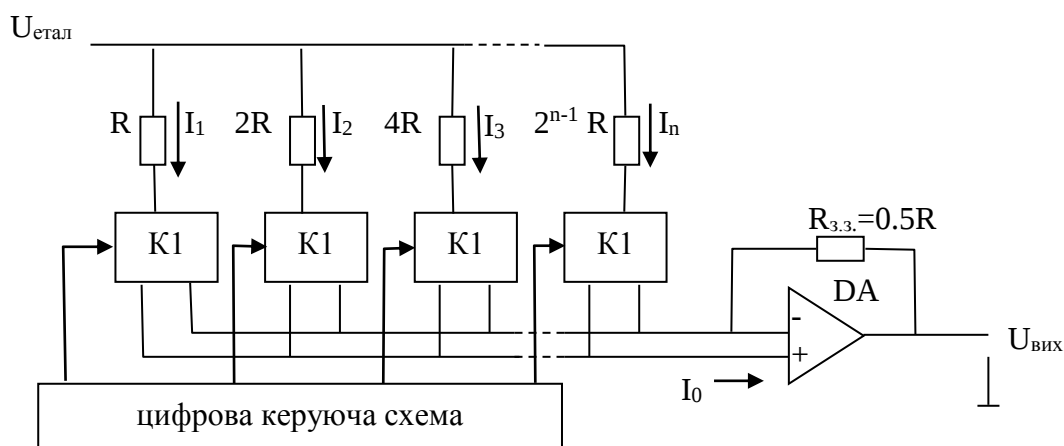
Вхідний аналоговий сигнал $U_{\text{вх}}$ перед початком перетворення запам'ятовується схемою вибірки-зберігання. Конденсатор C ключем S під'єднується до вхідного сигналу в період вибірки та вимикається при зберіганні. Завдяки майже миттєвого часового квантування (виборці) вхідного сигналу досягається швидкодія аналогово-цифрового перетворювача. Аналогова величина на виході схеми вибірки-зберігання U_0 , порівнюється компараторами з сигналами від еталонних резисторних подільників. Спрацьовує молодший компаратор, сигнал подається на дешифратор DC і перетворюється в двійковий вихідний код.



Застосування того чи іншого типу аналогово-цифрового перетворювача обумовлене поставленою задачею.

3.2.3 Цифро-аналоговий перетворювач

Служить для перетворення коду в пропорційний йому аналогову форму напруги або струму з метою відображення на показуючі приладах або узгодження з аналоговими елементами систем автоматики.



Принцип роботи цифро-аналогового перетворювача полягає в підсумуванні аналогових сигналів, що пропорційні ваговим розрядам вхідного цифрового коду:

$$U_{\text{aux}} = U_{\text{emal}} \left(a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + \dots + a_n 2^{-n} \right)$$

де $a_1...a_n$ – коефіцієнт війкових розрядів.

$K_1...K_n$ – ключі, що пов'язують вагові резистори з інверторним входом операційного підсилювача DA .

3.2.4. Засоби відображення інформації

Відображення вхідної та вихідної інформації впливає на продуктивність оператора. Всі пристрої відображення інформації використовуються для:

- *індикації та візуалізації;*
- *документування* (алфавітно-цифрові друкуючі пристрої, графокреслярі).

1. Пристрої індикації – забезпечують оперативне відображення інформації.

Розрізняють індикатори:

- *електромеханічні;*
- *з лампами розжарювання;*
- *на газорозрядних лампах;*
- *люмінесцентні;*
- *електронні.*

а) електромеханічні:

- лічильники імпульсів (реверсивні, неревверсивні) – мають цифровий барабан. (Швидкохідність 2...20 імпульсів на секунду. Інерційні)

- цифрові індикатори на крокових двигунах.

б) з лампами розжарювання:

- позиційні цифрові індикатори;

- проекційні цифрові індикатори;

- цифро синтезуючі індикатори (в вигляді мозаїчної сітки із мініатюрних лампочок у вигляді точок, полосок).

в) на газорозрядних лампах цифрові індикатори виконують у вигляді декади цифр торцьового або бокового розташування (декатрони).

г) люмінесцентні – мозаїчна сітка виконана з окремих сегментів вкритих люмінофором.

д) електронні:

- рідиннокристалічні (кристали стають не прозорими під дією прикладеної напруги. Мають низьке енергоспоживання, але малий строк служби, вузький діапазон робочих температур, низьку швидкодію, обмежену область застосування);

- світло діоди (низька напруга живлення, добра контрастність, використання різних кольорів, великий кут спостерігання, строк служби, велика швидкодія, можливість інтеграції з дешифраторами. Недолік: відносно велике споживання струму 3...30 мА).

Строк служби 10^6 годин.

За технологією виробництва розрізняють:

- гібридні (нанесення напівпровідника на ізоляційну основу);
- монолітні (отримані з монокристалу напівпровідника).

Способи формування знаків:

- сегментний (7 або 14 окремих сегментів);
- мозаїчний.

2. Пристрої документування

Поділяються:

- *електромеханічні*;
- *не механічні*.

За способом виводу кодових сигналів розрізняють пристрої

- *послідовної дії* (код поступає послідовно і знаки друкуються послідовно);
- *паралельної дії* (подається паралельний код і знаки всіх розрядів друкуються зразу цілою строчкою після отримання повного результату вимірювання).

Друкування може бути літерне, матричне.

Не механічні – використовуються методи зміни стану речовини основного та проміжного носія (ксерографія, електрографія, електротермія, електрохімія, фотографія і ін.)

3.3 Підсилювачі

Пристрої для підсилення потужності сигналу за рахунок додаткового джерела.

За видом використання енергії поділяються:

- *електричні*;
- *гідравлічні*;
- *пневматичні*;
- *механічні*.

Гідравлічні та пневматичні підсилювачі призначені для підсилення вхідної величини за потужністю та тиском (серводвигуни).

Механічні підсилювачі – муфти, редуктори, гальма (являють собою механічні трансформатори для перетворення зусиль, частоти обертання та крутного моменту).

Електричні	Коефіцієнт підсилення за потужністю	Стала часу
- магнітні	$10^3 \dots 10^6$	$1 \dots 10^{-2}$
- електромашинні	$10^3 \dots 10^4$	$1 \dots 10^{-2}$
- електронні (вакуумні, напівпровідникові)	$10^2 \dots 10^{12}$	$10^{-4} \dots 10^{-8}$

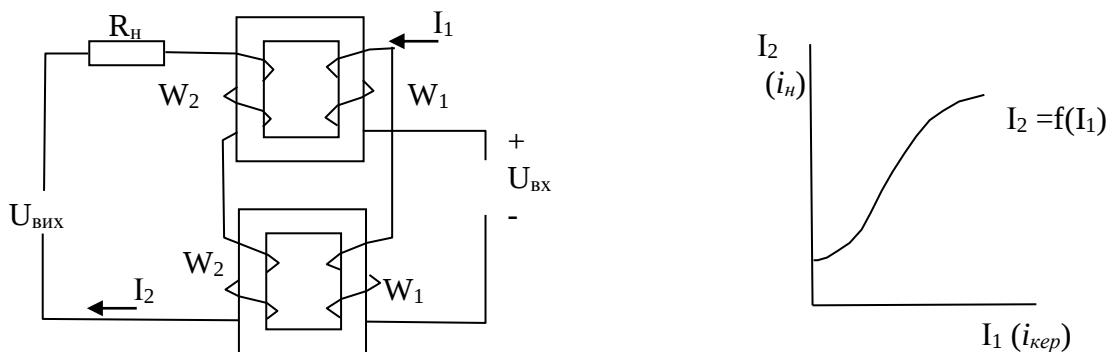
Вимоги до підсилювачів систем автоматики:

- підсилювачі повинні мати потрібний коефіцієнт підсилення за потужністю;

- стала часу (швидкодія) повинна бути меншою ніж в інших елементів системи;
- статична характеристика в робочій зоні повинна бути лінійною;
- межа чутливості повинна бути мінімальною і не перевищувати допустимого значення.

а) магнітні підсилювачі

Конструктивно є два однакових трансформатора з загальними феромагнітними осердями, що підмагнічуються постійним струмом.



Вторинні обмотки трансформаторів ввімкнуті послідовно з навантаженням R_n в мережу змінної вихідної напруги. Первинні обмотки W_1 називаються керуючими і з'єднані послідовно та зустрічно, щоб в них не індуктується змінний струм. Вхідна величина підсилювача є струм в обмотці W_1 , вихідна – змінний струм в обмотці W_2 та в R_n . При зростанні I_1 насичення осердь збільшується, а індуктивне опір зменшується, в результаті чого сила струму у вихідній ланці зростає.

Коефіцієнт підсилення за струмом $k = I_2/I_1$, за потужністю - $k = \Delta P_{\text{наван}}/\Delta P_{\text{керув}}$.

Використовуються для керування швидкістю двигунів змінного струму, в регуляторах напруги, частоти, температури.

Недоліком є мала швидкодія, великі малогабаритні показники, вартість.

Передаточна функція магнітного підсилювача:

$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1} \left(T = \frac{1}{4f} \frac{R_{\text{роб.обот}} \omega_{\text{кер}}^2}{R_{\text{обмот.кер.}} \omega_{\text{роб}}^2} \right)$$

б) електромагнітні підсилювачі

Робота основана на ефекті підсилення електричного сигналу в генераторах за рахунок механічної енергії приводного двигуна. Це машина постійного струму, в якій механічна енергія приводного двигуна перетворюється в енергію вихідного сигналу.

в) електронні підсилювачі

Поділяються на:

- вакуумні;
- напівпровідникові (транзисторні, тиристорні, діелектричні).

1. Вакуумні (лампові) – мають високе значення коефіцієнта підсилення, малу вхідну потужність, безінерційні. Недоліки: низький К.К.Д., мала вихідна потужність (100...200 Вт), низька вібростійкість, надійність, строк служби.

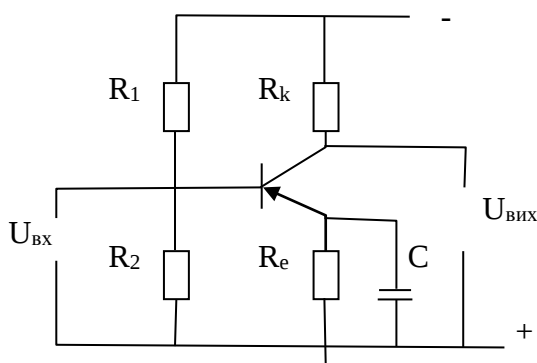
2. Іонні (відносяться до електричних) – мають більшу вихідну потужність ніж лампові (декілька кВт). Будуються на тиратронах. Недолік: не можливо керувати за допомогою сітки після запалювання.

3. Діелектричні – діють за принципом залежності параметрів деяких діелектриків від напруженості електричного поля. Параметри цих підсилювачів залежать від температури та вологості. (Варікап - напівпровідниковий діод, що змінює ємність в залежності від напруги; вариконд – сегнетокерамічний конденсатор з різкою залежністю ємності від напруги)

4. Транзисторні

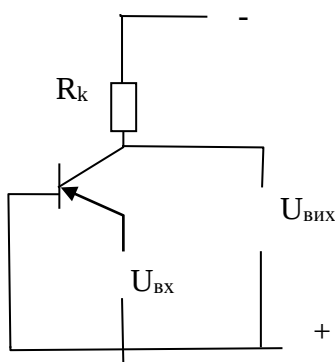
За способом вмикання поділяються:

- з загальним емітером



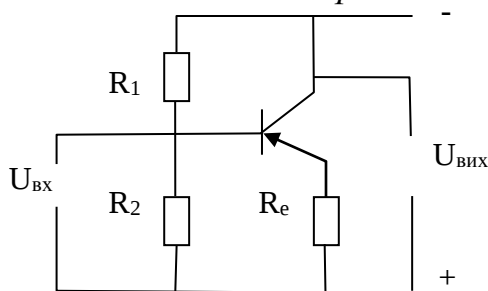
Найбільш розповсюджені, так як дозволяють отримати високий коефіцієнт підсилення за потужністю (10^3) та струмом, має великий вхідний опір (близько 1кОм). Вихідна напруга зсунута за фазою на π відносно вхідної.

- з загальною базою



Має малий вхідний опір (10...100 Ом) і великий вихідний. Підсилення за струмом менше одиниці, а за напругою набагато більше одиниці. Вихідна напруга знаходиться в фазі з вхідною. Застосовується як вхідний каскад для підсилення сигналів від датчика з низьким вхідним опором.

- з загальним колектором



Високий вхідний опір ($10^3...10^6$ Ом) та малий вихідний (10...100 Ом). Підсилення за струмом майже таке, як і в схемах з загальним емітером, а за напругою – менше одиниці. Підсилення за потужністю найменше ніж в схемах з загальним емітером та

базою. Вихідна напруга співпадає за фазою з вхідною. Застосовується як первинний каскад для вмикання з високоомними датчиками, а також як вихідний каскад при роботі з низькоомним навантаженням.

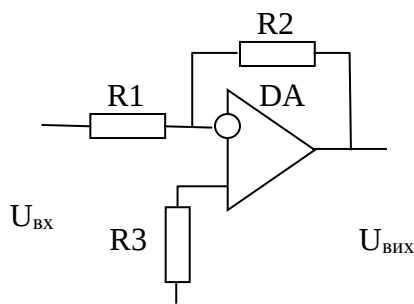
Для транзисторних підсилювачів характерна висока надійність, великий строк служби, незначна споживана потужність, швидкодія малогабаритні параметри. Недоліки обумовлені фізичними властивостями транзисторів – залежністю параметрів від температури, перенапружень.

4. Операційні підсилювачі

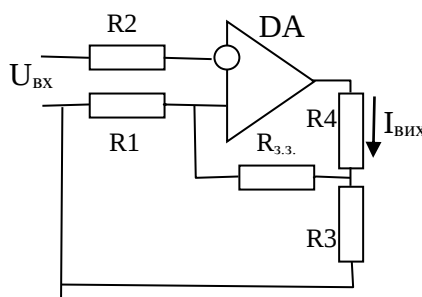
Називаються підсилювачі постійного струму, що призначені для роботи з глибоким зворотним зв'язком та виконання математичних операцій з вхідним сигналом (множення на постійний коефіцієнт, сумування, віднімання, інтегрування, диференціювання, нелінійні перетворення та ін.). За принципом дії операційні підсилювачі подібні до звичайних підсилювачів, але переваги визначаються параметрами кола зворотного зв'язку. Операційний підсилювач характеризується великим коефіцієнтом підсилення, високим вхідним і низьким вихідним опором. Вхідний каскад виконаний як диференціальний підсилювач (два входи – інверторний та неінверторний), живлення – двополярне.

Для сигналів низького рівня (0...1000мВ) застосовують нормуючі підсилювачі, що перетворюють вихідний сигнал термопар, піранометрів в уніфіковані сигнали струму або напруги:

- з виходом за напругою



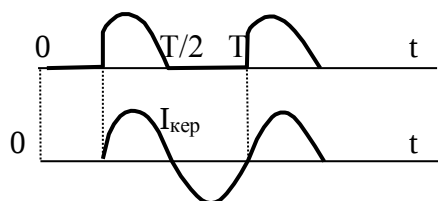
- з виходом за струмом



В залежності від діапазону вхідного сигналу та потрібної точності застосовують підсилювачі з модуляцією та наступною демодуляцією сигналів.

6. Тиристорні підсилювачі

Утворені на базі напівпровідникових трьохелектродних приладів чотирьох або п'ятишарової структури. Тиристор може знаходитись тільки в двох стійких станах – ввімкненому та вимкненому. Перехід тиристора з закритого стану у відкритий здійснюється подачею сигналу на електрод керування. При змінному струмові користуються фазовим методом керування.



Застосування в широкому діапазоні струму (10^2 мА... 10^2 А) та напругою (10...100 В). Мають малі габарити, високий К.К.Д., надійність, але вони чутливі до перевантажень за струмом.

3.4 Елементи та пристрої дискретної дії

Дискретні елементи – це пристрої, вихідний сигнал яких може приймати декілька фіксованих значень при певній зміні стану вхідних сигналів. Залежність $y = f(x)$ – нелінійна.

Властивості дискретних елементів:

- передача сигналів тільки від входу до виходу;
- незалежність стану входів та внутрішньому стану від вихідних сигналів;
- роздільність входу та виходу.

Дискретні елементи за своїми властивостями поділяються на:

1. Контактні елементи - вихідний сигнал утворюється за рахунок замикання механічних контактів (до них відносять сукупність електромеханічних пристроїв).
2. Безконтактні елементи - вихідний сигнал формується за рахунок зміни параметрів самого елемента (опору, ємності, внутрішнього стану. До них відносять напівпровідникові, інтегральні, логічні пристрої).
3. Двохпозиційні елементи – мають два внутрішніх стану: відсутність – „0”, наявність – „1” (реле, діоди, транзистори).
4. Багато позиційні елементи – наявність більше двох стійких станів. Послідовність переходу від одного стану до іншого визначає послідовність надходження сигналів на його входи (трьох позиційні реле, багато позиційний перемикач, крокові шукачі).
5. Логічні елементи – після припинення дії вхідних сигналів їх вихідний сигнал приймає початковий стан (не запам'ятовує вхідну дію. До них відносять нейтральні реле, діоди, транзистори, інтегральні мікросхеми).
6. Елементи пам'яті – зберігають свій внутрішній стан після припинення вхідної дії (поляризоване реле, тригери, лічильники, крокові шукачі, розподільники імпульсів).
7. Активні елементи – формують вихідний сигнал за рахунок зовнішнього джерела енергії, а їх вхідний сигнал служить тільки для керування елементами (транзистори, електромагнітні реле, інтегральні мікросхеми).
8. Пасивні елементи – формують вихідний сигнал за рахунок енергії вхідного сигналу (без зовнішнього джерела живлення. До них відносять напівпровідникові діоди, електромагнітні реле максимального струму).

3.4.1 Електромеханічні пристрої

В сільськогосподарських системах автоматики є основним елементом, так як порівняно з безконтактними елементами мають ряд переваг:

- повна відсутність гальванічного зв'язку між вхідним і вихідним колами;
- можливість комутації в колах як постійного так і змінного струму;
- допустимість значних перевантажень в колах контакті за струмом та напругою;
- малі втрати потужності в контактному переході;
- незалежність від впливу електричних і магнітних полів;
- нечутливість до температурних перевантажень;

- висока електроміцність;
- простота в обслуговуванні.

Реле поділяються:

1. За часом спрацювання:

- *безінерційні* ($< 10^{-3} \text{с}$);
- *швидкодіючі* ($< 0,05 \text{с}$);
- *нормальні* ($0,05 \text{с} < t < 0,15 \text{с}$);
- *уповільнені* ($0,15 \text{с} < t < 1 \text{с}$);
- *реле часу* ($t > 1 \text{с}$).

2. За видом фізичної величини, на яку реагують:

- *електромагнітні*;
- *магнітоелектричні*;
- *електродинамічні*;
- *індукційні*;
- *феромагнітні*;
- *електронні та іонні*;
- *електротеплові*;
- *резонансні*.

а) електромагнітні реле:

- постійного струму: *нейтральні* (однаково реагують на напрямок струму) та *поляризовані* (напрямок переміщення якоря залежить від напрямку струму в обмотці; характерна висока чутливість, малий час спрацювання).
- змінного струму – спрацьовують при живленні обмотки змінним струмом певної частоти і конструктивно відрізняються від реле постійного струму виконанням якоря та осердя – із листової сталі (зменшуються витрати на гістерезис та струми Фуко), наявністю кільця (з міді – для усунення вібрації полюсів). Керують навантаженням $0,1 \dots 10^4 \text{ Вт}$.

б) магнітоелектричні реле – замість покажчика (стрілки) використовують якір (у вигляді рамки) з контактами. Цей тип належить до найбільш чутливих реле. Керують навантаженням малої потужності $0,1 \dots 0,2 \text{ Вт}$.

в) електродинамічні реле – за принципом дії подібні до магнітоелектричних, але в них магнітне поле утворюється спеціальною обмоткою збудження, що розміщена на магнітопроводі. Працює як на постійному так і на змінному струмі. Використовують як реле зсуву фаз (спрацьовують при певному куті між фазами).

г) індукційне реле – використовує явище взаємодії зміни магнітного потоку, що створюється обмоткою реле, та струму, індукується в рухомому диску, циліндрі або короткозамкненій рамці. Працюють тільки на змінному струмі. Мають одну або дві обмотки на які подають вхідні сигнали. Під дією вхідного сигналу утворюють зусилля обертання ($F = k I_1 I_2 \cos \varphi$). Знаходять широке застосування в пристроях автоматичного захисту електроустановок як реле потужності, фази, струму, частоти.

- д) феромагнітні реле – реагують на зміну магнітної величини (магнітного потоку, напруженості магнітного потоку) або магнітних характеристик феромагнітних матеріалів (магнітної проникливості, залишкової індукції).
- є) електронні та іонні реле реагують безпосередньо на силу струму, напруги, під дією яких проходить стрибкоподібна зміна провідності електричних, напівпровідникових або іонних приладів.
- ж) електротеплові реле – основані на зміні лінійних, об'ємних величин, перехід агрегатного стану, зміну питомого опору або діелектричної проникності під дією температури.
- з) резонансні реле – використовують явище резонансу в електричних коливальних системах (застосовують в частотних пристроях захисту та телемеханіки).
- і) магніто керовані контакти – геркони, герконові реле.
- к) реле витримки часу – виконують з пристроями уповільнення – електричними, механічними, пневматичними, гідравлічними. Для малих витримок часу (0,5 с) застосовують схемне рішення з $R-C-L$ -ланцюгами.
- л) крокові шукачі – багато позиційні перемикачі, що замінюють велику кількість реле (мають до 500 контактів).

3.4.2 Логічні пристрої (елементи).

Електромеханічні пристрої мають відносно малу надійність, швидкодію, великі малогабаритні показники, погано працюють в умовах підвищеної вологості, запиленості, вібрації, що характерні для умов сільськогосподарського виробництва.

Інтенсивність відмов контактів апаратів складає 10^{-5} 1/год (1 на 10^5 спрацювань). Автоматичні системи керування сільськогосподарського виробництва інколи мають від 40 до 2000 електротехнічних елементів, число спрацювань яких досягає декілька сотень на годину. Досвід експлуатації показує, що через 20000 спрацювань контактів треба зупинити лінію для профілактичного обслуговування та ремонту. Практика показує, що складні системи релейної автоматики (потоків ліній в тваринництві) безвідмовно працюють не більше декілька десятків годин.

Заміна електромеханічних пристроїв на безконтактну апаратуру доцільна як захід підвищення швидкодії та надійності систем автоматики. Безконтактні пристрої виконуються на логічних елементах складених з транзисторів, інтегральних мікросхем. На вхід логічного елемента подаються електросигнали від датчиків, стандартизованих за рівнем струму та напруги, а на виході під'єднуються електромеханічні пристрої автоматики та інші виконавчі елементи.

При вивченні усталеного стану окремих дискретних елементів систем автоматики без врахування їх поведінки в часі використовують спеціальний математичний апарат – *алгебру логіки* (або Булева алгебра). Різниця від звичайної алгебри – вона є алгеброю стану, а не чисел.

При застосуванні алгебри логіки використовують такі позначення:

$A, B, \dots, X$ – вхідні елементи пристроїв автоматики;

$a, b, \dots, x$ – відповідні їх замикаючі контакти;

$\bar{a}, \bar{b}, \dots, \bar{x}$ – розмикаючі контакти;

$a + b$ – паралельно з'єднані контакти;

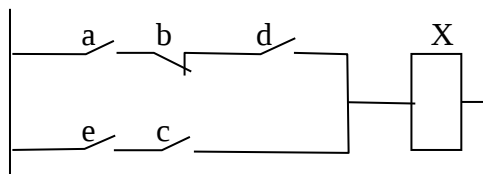
$a \cdot b$ – послідовно з'єднані контакти;

1 – постійно замкнене коло;

0 – постійно розімкнене коло;

f – структурна формула контактів;

F – структурна формула всієї системи.



$$f = a \cdot \bar{b} \cdot d + e \cdot c$$

$$F = (a \cdot \bar{b} \cdot d + e \cdot c) X$$

В алгебрі логіки застосовують тільки дві математичні дії: „+” (паралельне з’єднання) та „·” (послідовне з’єднання).

В алгебрі логіки виділяють три основні логічні функції:

- *логічне множення* або *кон’юнкція* – (I). Структурна формула контактів $f = a \cdot b$ (функція прийме значення 1 – коло замкнене – тоді і тільки тоді, коли a і b дорівнюють 1);

- *логічне додавання* або *диз’юнкція* – ($АБО$). Структурна формула контактів $f = a + b$ (функція прийме значення 0 – коло розімкнене – тоді і тільки тоді, коли обидва аргументи дорівнюють 0 а значення 1 при $a=1$ або при $b=1$); $f = \bar{a}$

- *логічне заперечення* – ($НЕ$). Структурна формула контактів $f = \bar{a}$ (вихід завжди протилежний входу).

Крім трьох основних функцій, застосовують похідні від їх комбінацій:

1. *АБО-НЕ* – (інверсія суми – стрілка Пірса). Структурна формула $f = \overline{a + b}$.

Значення 1 – коло замкнене – буде тоді і тільки тоді, коли обидва аргументи дорівнюють 0 .

2. *I-НЕ* – (інверсія добутку – штрих Шиффера). Структурна формула $f = \overline{a \cdot b}$. Значення 0 – коло розімкнуте – буде тоді і тільки тоді, коли обидва аргументи дорівнюють 1 .

3. „*Рівнозначність*” – $f = \overline{a \cdot b} + a \cdot b$. Функція прийме значення 1 – коло

замкнене – буде тоді і тільки тоді, коли обидва аргументи мають однакове значення і приймає стан 0 – коло розімкнуте – , коли різні значення.

4. „Нерівнозначність” - $f = a \cdot \bar{b} + \bar{a} \cdot b$. Функція прийме значення 1 - коло замкнене – буде тоді і тільки тоді, коли a або b дорівнюють 1, але не обидва разом.

5. „Імплікація” - $f = \bar{a} + b$. Функція приймає значення 0 тоді і тільки тоді, коли $a=1$, а $b=0$.

6. „Заборона” - $f = a \cdot \bar{b}$. Функція приймає значення 0, коли на вході b подано сигнал 1, незалежно від виду сигналу на вході a .

7. „Повторення” – $f=ka$. Функція в k -раз відрізняється від вхідного сигналу і співпадає за знаком.

8. „Затримка” – $f=a(t-\tau)$. Функція прийме значення, що співпадає або не співпадає за знаком, від вхідного сигналу a , через час τ після його подачі.

Алгебра логіки має чотири пари законів:

1. Переставний закон:

- при зміні місць паралельно з'єднаних контактів дія схеми не змінюється

$$a + b = b + a$$

- при перестановці послідовно з'єднаних контактів дія схеми не змінюється

$$a \cdot b = b \cdot a$$

2. Сполучний закон:

- відносно додавання

$$(a + b) + c = a + (b + c)$$

- відносно множення

$$(a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c)$$

3. Розподільний закон:

- відносно додавання

$$(a + b) \cdot c = a \cdot c + b \cdot c$$

- відносно множення

$$a \cdot b + c = (a + c) \cdot (b + c)$$

3. Закон інверсії:

- відносно додавання

$$\overline{a + b} = \bar{a} \cdot \bar{b}$$

(для замикання кола треба, щоб спрацювало хоча б одне реле; для розмикання кола достатньо щоб спрацювало хоча б одне реле)

- відносно множення

$$\overline{a \cdot b} = \bar{a} + \bar{b}$$

(для замикання або розмикання кола треба, щоб спрацювало обидва реле)

Від звичайної алгебри алгебра логіка відрізняється розподільним законом відносно множення та законом інверсії.

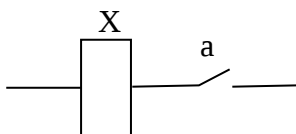
При аналізі та спрощенні формул дискретних пристроїв користуються не тільки законами алгебри логіки, але й наслідками цих законів:

$$\begin{array}{ll}
 a \cdot \bar{a} = 0 & a + \bar{a} = 1 \\
 a \cdot 1 = a & a + 1 = 1 \\
 a \cdot 0 = 0 & a + 0 = a \\
 a \cdot a \cdot a = a & a + a + a = a \\
 a + a \cdot b = a(1 + b) = a & a(a + b) = a \\
 a + \bar{a} \cdot b = a + b & \bar{a} + a \cdot \bar{b} = \bar{a} + \bar{b}
 \end{array}$$

3.4.3 Принципи побудови схем

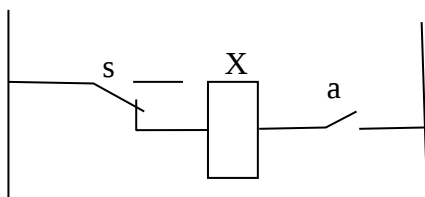
За характером роботи схеми з дискретними елементами поділяються на:

- *однотактні*



Стан виконавчих елементів однозначно визначається станом елементів, які є приймачами в будь-який момент часу. Дія x однозначно залежить від елемента, що замикає контакт a . Проміжних елементів немає.

- *багатоактні*



В роботі приймальних і виконавчих елементів передбачається певна послідовність, для здійснення якої необхідна наявність проміжних елементів. Дія x залежить не тільки від контакту a , але й від стану S .

При побудові дискретних систем автоматики вирішують дві задачі:

- перша: *аналіз* дискретних систем автоматики – визначають умову роботи кожного елемента та послідовність їх дії;
- друга: *синтез* дискретних систем автоматики – знаходять структуру схеми за заданими умовами її роботи.

Аналіз і синтез дозволяє отримати схему з мінімальною кількістю елементів.

Синтез систем дискретної дії

Він складається з двох етапів:

- *абстрактний синтез* – включає опис алгоритму керування, завдання умов роботи, побудови діаграм тактів та таблиць станів;
- *структурний синтез* – здійснює формалізацію запису умов роботи, виконання мінімізації структурних формул, будується принципова електросхема керування.

Приклад: скласти електросхему звукової та світлової сигналізації граничних положень поворотного механізму. Треба використати кінцеві вимикачі з перемикаючими контактами $[a, b]$, дзвоник $[D]$ і дві сигнальні лампи: для максимального рівня $[SL1]$ та мінімального рівня $[SL2]$.

Умова вмикання сигналізації максимального рівня:

$$F_1 = a \cdot \bar{b}(SL1) + a(D)$$

Умова вмикання сигналізації мінімального рівня:

$$F_2 = \bar{a} \cdot b(SL2) + b(D)$$

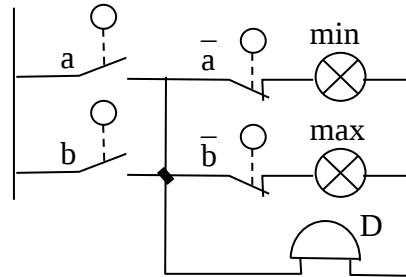
Схема повинна виконувати обидві умови:

$$F = F_1 + F_2 = a \cdot \bar{b}(SL1) + a(D) + \bar{a} \cdot b(SL2) + b(D)$$

Згідно цього запису кожний кінцевий вимикач повинен мати три контакти. Якщо додати два нульових члени $b\bar{b}(SL1)$ та $a\bar{a}(SL2)$, то отримаємо

$$F = (a+b) \cdot \bar{b}(SL1) + (a+b) \cdot \bar{a}(SL2) + (a+b)(D) \text{ або } F = (a+b)[\bar{b}(SL1) + \bar{a}(SL2) + D]$$

Вимикачі мають по два контакти.



Аналіз систем дискретної дії

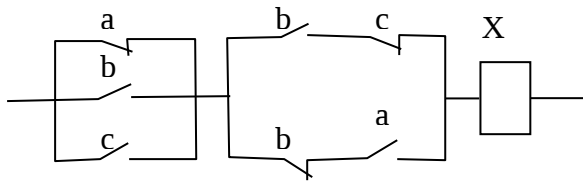
Полягає в мінімізації схем. Розрізняють такі способи:

- аналітичний;
- графоаналітичний;
- табличний.

а) при аналітичному способі використовують методи безпосередніх спрощень та Квайна — Мак-Класкі (при числі змінних більше трьох).

Послідовність способу: записують логічну функцію контактів, знаходять мінімальну форму запису функції, використовуючи закони та наслідки алгебри логіки.

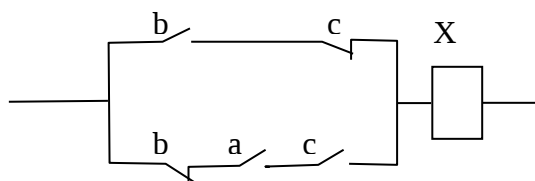
Приклад: Хай є схема:



$$\begin{aligned} f &= (\bar{a} + b + c)(b \cdot \bar{c} + \bar{b} \cdot a) = \bar{a} \cdot b \cdot \bar{c} + \bar{a} \cdot b \cdot a + b \cdot b \cdot \bar{c} + \\ &+ b \cdot \bar{b} \cdot a + c \cdot b \cdot \bar{c} + c \cdot \bar{b} \cdot a = \bar{a} \cdot b \cdot \bar{c} + b \cdot \bar{c} + \bar{b} \cdot c \cdot a = \\ &= b \cdot \bar{c}(\bar{a} + 1) + \bar{b} \cdot a \cdot c = b \cdot \bar{c} + \bar{b} \cdot a \cdot c \end{aligned}$$

Тоді маємо:

$$F = (b \cdot \bar{c} + \bar{b} \cdot a \cdot c)X$$



б) при графоаналітичному способі застосовують мінімізуючи карти (таблиці), що містять комбінацію станів схеми.

в) табличний спосіб – застосовують при наявності багато контактних схем. В таблиці послідовно записують зміну стану схеми при різних тактах вмикання.

Дані способи розповсюджуються на схеми, що мають будь-яку кількість входів і один вихід. У випадку, коли схема має декілька виходів, її розбивають на комбінацію кінцевого числа пристроїв з одним виходом, проводять аналіз кожної схеми, а потім об'єднують в одну загальну схему.

3.5 Виконавчі елементи систем автоматики

Виконавчим елементом називається пристрій призначення для переміщення робочого органу у відповідності з сигналами, що надходять від керуючого пристрою. (Робочі органи: засувка, крани, реостати.)

Виконавчий елемент – це кінцева ланка автоматичної системи керування. Вони повинні мати необхідну швидкодію, малу зону нечутливості, лінійну статичну характеристику.

Енергетичні показники:

- *номінальний момент* – величина моменту, що розвивається при номінальному значенню вхідного сигналу;
- *пусковий момент* – максимальне значення крутного моменту, що виникає в момент вмикання під дією номінальної величини керуючого сигналу.

Для зменшення часу розгону $M_{\text{пуск}} > (2 \dots 2,5) M_n$.

Порівнюють виконавчі елементи за К.К.Д., безвідмовністю роботи, повним технічним ресурсом, строком служби, ремонтнопридатністю, загальною надійністю.

Виконавчі елементи систем автоматики класифікують:

1. *За видом споживаної енергії:*

- електричні;
- пневматичні та гідравлічні;
- інші (потенціальна енергія вантажу, стиснутої пружини, енергія вибуху та ін.)

2. *За характером руху вихідного органу:*

- поворотні – одно обертові та багато обертові;
- прямохідні.

3. *За видом двигуна, що використовується:*

- електродвигунні;
- електромагнітні;
- поршневі;
- мембранні.

4. *В залежності від швидкості руху вихідного органу:*

- з постійною швидкістю;
- з пропорційною залежністю від вхідного сигналу.

В сільському господарстві найбільше розповсюдження отримали електричні виконавчі елементи, що поділяються на : *електромагнітні* та *електродвигунні*.

3.5.1 Електромагнітні виконавчі елементи (соленоїдні)

В залежності від умов застосування вони можуть бути:

- з *прямолінійним рухом* робочого органу (параметри – переміщення, швидкість, зусилля) ;
- з *обертовим рухом* робочого органу (параметри – кут повороту, частота обертання або обертний момент, що розвивається).

Електромагніти можуть бути змінного (одно- або трьохфазні) та постійного струму. В залежності від ходу якоря – короткоходові (до 2...4 мм) та довго ходові (40...120 мм).

Електромагніти повинні відповідати таким вимогам:

1. Конструкція, що вибирається, повинна відповідати довжині ходу, тяговому зусиллю та заданій тяговій характеристиці.
2. Для швидкохідних систем необхідно застосовувати електромагніти з шихтованим магнітопроводом, а для уповільнених – з не шихтованим магнітопроводом і поворотним якорем з масивною мідною гільзою.
3. Число циклів спрацювання повинно бути менше допустимого.
4. Електромагніти змінного струму, при однаковому виконанні механічної роботи, споживають електроенергії більше, ніж електромагніти постійного струму.
5. Електромагніти повинні бути зручними експлуатації та прості в обслуговуванні.

Електромагніти вибирають за напругою, струмом споживаною потужністю. Допустима температура нагрівання обмотки – 85...90 °С.

Передаточна функція електромагніту:

$$W(p) = \frac{k_M}{(T_e p + 1)(T_1^2 p^2 + T_2 p + 1)}$$

де $T_e = L_0/R_0$ – стала часу електромагніту;

T_1 – стала часу рухомої частини;

T_2 – стала часу демпферу.

Якщо стала часу об'єкту керування набагато більша T_e, T_1, T_2 , то передаточна функція буде становити:

$$W(p) = k_M \quad - \quad (\text{безінерційна ланка})$$

Область застосування електромагнітів – не велика – із-за двопозиційного характеру дії, малогабаритних розмірів. Тягове зусилля пропорційне квадрату сили намагнічування.

Електромагніти змінного струму мають значно гірші показники ніж електромагніти постійного струму.

Електромагніти за принципом дії поділяють на:

- електромагніти, що розраховані на тривалу роботу (наприклад: при подачі напруги, якір втягується і відкриває вентиль). Недолік: постійне споживання електроенергії.
- електромагніти, що розраховані на короткочасний режим роботи (мають два електромагніти: головний та додатковий. При спрацюванні додаткового, обмотка головного – знеструмлюється).

Електромагнітні муфти - проміжна ланка між приводом і робочим органом. В залежності від виду зв'язку їх поділяють на:

- *фрикційні сухого тертя та в'язкого тертя;*
- *індукційні.*

Керуюча дія муфт здійснюється за рахунок зміни їх щеплення.

При виборі електромуфт враховують:

1. Принцип дії повинен співпадати з режимом роботи об'єкта керування – позиційної дії або при регулюванні частоти обертання.

2. Муфта повинна бути розрахована на потрібну потужність і мати переважувальну здатність.

3. Муфта повинна забезпечувати потрібний коефіцієнт передачі, швидкодію та надійність.

4. Повинна бути зручною в експлуатації та обслуговуванні.

Муфти сухого тертя для збільшення крутного моменту, що передається, виконуються багатодисковою.

Муфта в'язкого тертя діє за принципом намагнічування порошку (емульсії), що утворює щільуючий шар між веденим і ведучим елементами муфти. З ростом магнітного потоку зростає крутний момент, що передається.

Електромагнітна муфта ковзання (індукційна) являє собою конструкцію двох обертових напівмуфт, одна з яких має обмотку збудження (ведуча), а друга (ведена) – короткозамкнену обмотку за типом ротора асинхронного електродвигуна. Принцип роботи аналогічний роботі асинхронного двигуна. Застосовують для механізмів малої потужності як безступінчастий редуктор в діапазоні 1:8 при $M_n = 1,7 \dots 20$ Нм.

Передаточна функція муфт – $W(p) = k$.

3.5.2 Електродвигунні виконавчі елементи

Електродвигунні виконавчі елементи складаються з електродвигуна, редуктора та гальмів.

Електродвигунні виконавчі елементи дозволяють:

1. Пуск та зупинку в будь-якому положенні робочого органу.
2. Зупинку при перевищенні допустимого крутного моменту.

Оцінку відповідності виконавчого елемента умовам виробництва проводять:

1. За енергетичними, експлуатаційними, конструктивними та економічними показниками.

2. За статичними та динамічними властивостями виконавчих елементів (за статичною характеристикою визначають номінальну швидкість переміщення вихідного органу при номінальному навантаженню).

Крокові виконавчі механізми – застосовують в числовопрограмному керуванні, де потрібне однозначне перетворення числових даних в лінійне або кутове переміщення виконавчого органу. Робочий режим крокових двигунів – стопорний, при якому ротор нерухомий при постійних струмах, що протікають в обмотках статора та ротора. Крокові двигуни мають нижчі енергетичні показники ніж двигуни безперервної дії.

3.5.3 Вибір виконавчих механізмів

1. При двопозиційній роботі регулюючого органу їх вибирають тільки за енергетичними показниками.

2. При безперервному регулюванні – вибирають як привод інтегруючого типу.

4.0 АВТОМАТИЧНІ РЕГУЛЯТОРИ

Автоматичний регулятор – пристрій (або комплекс пристроїв) в автоматичних системах керування, який під'єднаний до об'єкта та призначений для підтримання величини, що керується, на заданому рівні або зміні її у відповідності з потрібним законом керування.

4.1 Класифікація автоматичних регуляторів

1. *За видом параметру, що керується* (температури, тиску, рівня, витрат та ін.).

2. *За енергетичними ознаками:*

- прямої дії (для їх дії використовують частину енергії від об'єкту керування);

- непрямої дії (енергія підводить зовні). Вони поділяються на:

- а) електричні (електромеханічні, електронні). Переваги: простота реалізації складних схем автоматичного керування, швидкодія, виробіток та передача на далекі відстані керуючих сигналів. Недоліки: підвищена вартість, електробезпека та вибухонебезпека, необхідність обслуговування кваліфікованим персоналом.

- б) пневматичні. Переваги: прості в обслуговуванні, безпечні. Недоліки: необхідність додаткових джерел живлення, інерційність, обмеженість дії в просторі – до 400м.

- в) гідравлічні. Переваги: надійні, розвивають великі зусилля за переміщенням. Недоліки: обмежена дія в просторі та неможливість реалізації складних автоматичних схем.

- г) комбіновані – використовуються там, де треба комбінація переваг попередніх регуляторів.

3. *За конструктивними ознаками:*

а) апаратного типу – мають вимірювальні пристрої для контролю за дійсними значеннями величинами, що керуються;

б) приладного типу – сигнал про величину, що керується, надходить на вимірювальний прилад, одночасно проходить його з заданим значенням та видається сигнал керування;

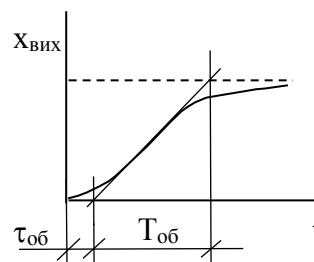
в) агрегатного (блочного) типу – виконують різноманітні функціональні дії;

г) модульного (елементного) типу складаються з окремих модулів і виконують прості операції.

(Чіткої межі між агрегатними та модульними автоматичними регуляторами немає)

3. За дією на об'єкт:

- релейні - $\tau_{об}/T_{об} < 0,2$;
- безперервні - $0,2 < \tau_{об}/T_{об} < 1,0$;
- імпульсні - $\tau_{об}/T_{об} > 1,0$.



4.2 Типові структури регуляторів

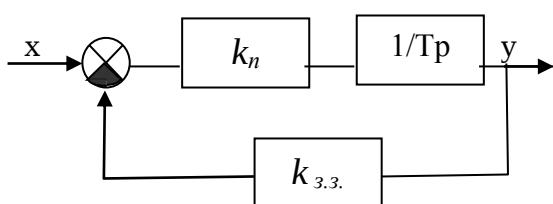
1. *Позиційні (релейні) регулятори* – працюють за принципом „ввімкнуто – вимкнуто” та забезпечують фіксоване положення (позицію). Положень буває одне, два, три і більше, а регулятори – двох-, трьох- та багатопозиційні. Процес позиційного регулювання – автоколивальний, тобто величина, що регулюється відносно заданого значення, періодично змінюється. Щоб зменшити період коливань зменшують зону нечутливості, але збільшують число перемикачів регулятора. В той же час зростання сталої часу збільшує період коливань і зменшує частоту перемикачів регулятора.

2. *Регулятори безперервної дії* – в них виконання всіх операцій здійснюється в безперервній формі. В основі їх дії лежать закони регулювання – залежність між вхідними та вихідними координатами сигналів.

а) *пропорційний регулятор (П-регулятор)*

Передаточна функція $W(p)=k$. Реальний промисловий регулятор має ланку підсилення $W(p)=k_n$ та виконавчий пристрій $W(p)=1/Tp$. (В динамічному відношенні виконавчий механізм є інтегруючою ланкою)

$$W(p) = \frac{k_y/T \cdot p}{1 + k_y \cdot k_{зз}/T \cdot p} = \frac{1}{k_{зз}} \cdot \frac{1}{[T/k_n \cdot k_{зз}]p + 1} = W(p) \cdot W_{бал}(p)$$



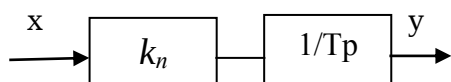
де $W_n(p)$ – ідеальний П-регулятор;
 $W_{бал}(p) = 1/(T_{бал}p + 1)$ – баластна ланка.

Для зменшення впливу баластної ланки підвищують значення коефіцієнта підсилення.

Основною перевагою П-регулятора – швидкодія. Його застосовують для регулювання без самовирівнювання та в тих випадках, коли в об'єктах спостерігаються часті відхилення навантаження. Недолік: залишкове відхилення параметра, що регулюються.

б) Інтегральний регулятор (І-регулятор)

І-закон регулювання отримують в тому випадку, коли структурна схема складається з послідовно з'єднаних підсилюючої та інтегруючих ланок.



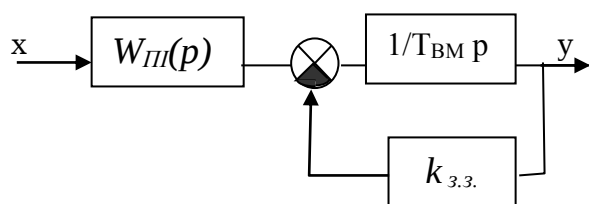
Інтегруючою ланкою виступає найчастіше гідравлічний або електричний виконавчий механізм.

Позитивна особливість – в усталеному режимі значення керуючого параметру залишається постійним, незалежно від зміни навантаження об'єкта (є астатичним). Допускають значну зміну навантаження. Недолік: великий час регулювання (не можуть застосовуватись на об'єктах без самовирівнювання).

в) пропорційно-інтегральний регулятор (ПІ-регулятор)

Розробляється в декількох варіантах:

1.



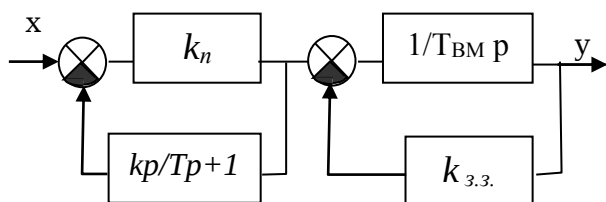
Для зменшення впливу виконавчого механізму на закон регулювання, введено зворотний зв'язок через ланку підсилення $W_{33}(p) = k_{33}$. Ця схема має похибку, що визначається баластною аперіодичною ланкою з сталою часу

$$T_{бал} = T_{VM} / k_{33}$$

де T_{VM} – стала часу виконавчого механізму.

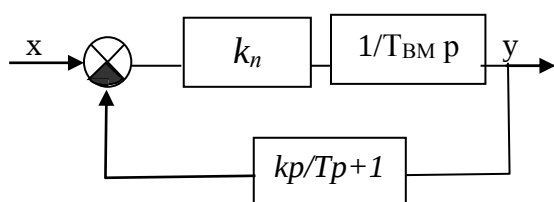
Але надмірне збільшення k_{33} призводить до зменшення коефіцієнта передачі ПІ-регулятора.

2.



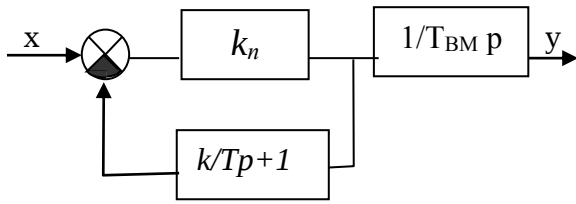
ПІ-регулятор реалізується за рахунок динамічних властивостей каналу зворотного зв'язку в частині підсилення в вигляді диференційної ланки $kp/(Tr+1)$.

3.



ПІ-регулятор реалізується за рахунок динамічних властивостей каналу зворотного зв'язку як в ланці підсилення, так і в виконавчій ланці.

4.



Динамічні властивості виконавчого механізму використані для формування пропорційно-інтегрального закону:

$$W_{III}(p) = \frac{1}{W_{33}(p) \cdot T_{BM} \cdot p}$$

Якщо $W_{III}(p) = \frac{k_p(Tp+1)}{Tp}$, то

$$W_{33}(p) = \frac{1}{W_{III}(p) \cdot T_{BM} p} = \frac{Tp}{k_p(Tp+1)T_{BM} p} = \frac{k}{Tp+1}$$

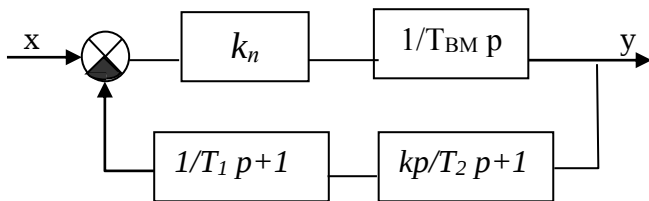
де k_p – коефіцієнт регулювання;

$k = T/k_p T_{BM}$ (T – час ізодрому)

Таким чином, введення гнучкого зворотного зв'язку вказує, що ПІ-регулятор є регулятором непрямої дії. ПІ-регулятор забезпечує стійку роботу на об'єктах без самовирівнювання, так як пропорційна складова охоплює об'єкт зворотним зв'язком і складає ефект самовирівнювання.

г) пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятори (ПІД-регулятори)

ПІД-регулятор на практиці отримують шляхом під'єднання блока – диференціатора до ПІ-регулятора. Блок-диференціатор видає сигнал, що пропорційний швидкості зміни параметра, який регулюється та вмикається в ланку вимірювання або керування. Існують різні схеми, наприклад:



Канал зворотного зв'язку складається з послідовно з'єднаних аперіодичної та реальної диференційної ланок.

4.3 Вибір регуляторів

Вибір регулятора залежить від властивостей об'єкту регулювання, що визначається його динамічною характеристикою.

Регулятори застосовуються:

- П-регулятор: в об'єктах з невеликим запізненням та значним навантаженням і де допускається статична похибка. П-регулятор не рекомендується при коливальному навантаженні;
- І-регулятор: на об'єктах з значним самовирівнюванням і невеликим запізненням, а також при малій і великій ємності об'єкту та при повільних змінах навантаження;
- ПІ-регулятор: в об'єктах з будь-якою ємністю, з великим запізненням ($\tau > 0, 1T$), а також при великих і повільних змінах навантаження;

- ПІД-регулятор: в об'єктах з будь-якою ємністю, при дуже малій статичній похибці регулювання та при суттєвому запізненні в об'єкті ($\tau/T = 0,2 \dots 1$).

Імпульсні регулятори: в об'єктах без великих запізнень, при середній ємності об'єкта, де навантаження постійне або мало змінюється ($\tau/T = 0,5 \dots 10$).

Двопозиційні релейні регулятори: в об'єктах з великою ємністю, без великого запізнення при постійному або мало змінному навантаженні ($\tau/T < 0,2$).

5.0 СИСТЕМИ ТЕЛЕМЕХАНІКИ

Телемеханіка – обдасть науки та техніки, що займається керуванням механізмами та машинами на відстані (запропонована Е.Бранлі в 1905р.).

Засоби телемеханіки виконують дві основні задачі:

- передача технологічної інформації як повідомлення;
- передача командної інформації.

Системи телемеханіки розрізняють:

1. *Телекерування* – розділ телемеханіки, що включає в себе методи та технічні засоби передачі на відстань команд керування режимами технологічних процесів, установок в цілому, положень різних вузлів та ін.

2. *Телесигналізація* – частина телемеханіки, що охоплює методи та технологічні засоби передачі на відстань інформації про хід технологічних процесів, роботи установок в цілому, положення окремих елементів та ін.

3. *Телевимірювання* – розділ телемеханіки, що містить в собі методи та технічні засоби передачі на відстань результати вимірювання будь-яких параметрів, що контролюються (постійних або змінних в часі).

4. *Телерегулювання* – частина телемеханіки, охоплює методи та технічні засоби передачі на відстань команд регулювання.

В сільському господарстві телемеханіка застосовується в іригаційних системах, в тепличних комбінатах, тваринницьких комплексах та птахофермах. Телемеханіка забезпечує дистанційне керування рознесених об'єктів.

5.1 Будова систем телемеханіки

Всі системи майже завжди пов'язані між собою.

Методи та технічні засоби різних систем мало чим відрізняються один від одного. Засоби телемеханіки поділяються на:

- пристрої пункту керування;
- пристрої пункту, що контролюється .

Взагалі ці засоби утворюють телемеханічний комплекс.

Системи телемеханіки являють собою сукупність телемеханічних комплексів, датчиків, засобів інформації, диспетчерського обладнання та

каналів зв'язку, що виконує задачу централізованого контролю та керування територіально розташованими об'єктами.

Датчики служать для отримання первинної інформації від об'єкту керування. На пункті керування вона оброблюється і передається оператору в певній формі – звуковій, друкарській та іншій. Диспетчерське обладнання складається із щитів з мнемосхемою, пульта керування, друкарського та реєструючі приладів.

Об'єкти керування та контролю поділяються на рухомі та стаціонарні.

Стаціонарні бувають зосереджені (встановлюють один пункт контролю для групи об'єктів керування) та не зосереджені (один пункт контролю на один об'єкт керування).

За структурою лінії зв'язку системи телемеханіки поділяються:

- радіальні (кожний пункт контролю з'єднаний з пунктом керування окремою лінією);
- ланцюгові (забезпечують роботу при послідовному або паралельному під'єднанні пункту контролю до однієї лінії зв'язку);
- з деревоподібною структурою ліній зв'язку (передбачає з'єднання пункту керування з декількома пунктами контролю за довільною мережею ліній зв'язку).

За характером повідомлення системи телемеханіки поділяються на:

- дискретні;
- безперервні.

За принципом передачі повідомлень розділяють системи:

- спорадичної дії (спорадікос – з грецької – випадковий, розсіяний) – передають інформацію тільки при зміні стану об'єкту або зміні параметра, що вимірюється, на задану величину;
- циклічної дії – передаються повідомлення циклами, що розподіляються за часом, незалежно від стану об'єкту або значень параметру, що вимірюється.

Телемеханічні системи бувають:

- одноканальні – сигнал відповідає одному повідомленню про контактний об'єкт керування або контролю;
- багатоканальні – сигнал відповідає низці повідомлень.

Ефективність систем телемеханіки оцінюється її властивістю забезпечувати передачу заданої кількості інформації найбільш економічним способом з найменшими викривленнями.

Основна відмінність систем телемеханіки від місцевих систем керування полягає в тому, що в системах телемеханіки сигнали від датчиків і пристроїв керування підлягають різним перетворенням (квантуванню, дискретизації, кодуванню, модуляції, підсиленню), що дозволяє з первинних сигналів отримувати такі, які забезпечують передачу інформації на відстань (від декількох сотень метрів до декілька тисяч кілометрів) з заданими параметрами якості.

5.2 Види сигналів та їх кодування

Всі сигнали, що є носіями інформації, поділяються на:

- статичні (газети, кінострічки, магнітні стрічки, диски, дискети та ін.);
- динамічні (електричні, світлові, акустичні та ін.).

Динамічні можуть бути:

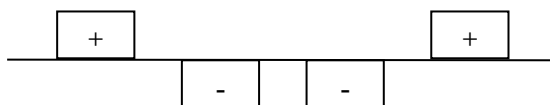
- безперервні – приймають безперервну множину значень на деякому відрізку часу і в діапазоні, що обмежує його мінімальне та максимальне значення. Його застосовують в телевізійних системах близької дії;
- дискретні – приймають кінцеву множину значень в певному інтервалі часу і в діапазоні величин (тобто він дискретизується за часом, і за рівнем).

Безперервний сигнал може бути перетворений в дискретний. Цей процес називається квантуванням сигналу.

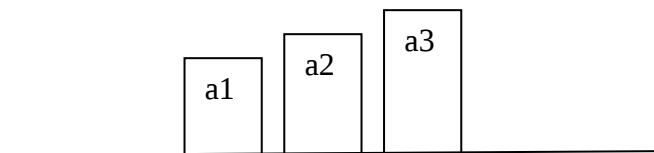
Як елементи сигналу в телемеханіці використовують імпульси та паузи постійного струму, а також імпульси з заповненням гармонійних коливань напруги або струму різної частоти.

Ознаками імпульсів можуть бути полярність, амплітуда, тривалість, частота та фаза коливань.

2. *Полярна ознака.* Число ознак $m=2$. Застосовують при наявності лінії зв'язку.



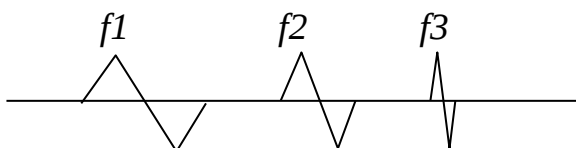
3. *Амплітудна ознака.* Число ознак на практиці використовують $m=2$, так як ця ознака підпадає дії перешкод.



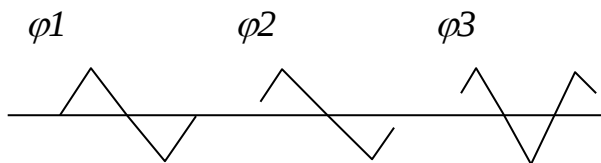
4. *Часова ознака* – тривалість імпульсу або паузи різна. Число ознак $m \geq 2$.



5. *Частотна ознака.* Число ознак $m \geq 10$.



6. *Фазова ознака.* Число ознак $m = 2$, так як зсув фаз вимагає складного обладнання.



Сигнали в телемеханіці утворюються із окремих елементів, що являють собою імпульси з окремими ознаками або комбінацію імпульсів з різними ознаками.

5.3 Методи відокремлення та вибору сигналів

Відокремлення та вибір сигналів характеризує дві сторони питання передачі сигналу:

- передачі багатьох сигналів за одним каналом зв'язку;
- адресну передачу сигналів об'єктам.

Тобто методи відокремлення відносяться до лінії, а методи вибору – до об'єкту.

Методи відокремлення:

- схемний – імпульси посиляються за окремими каналами зв'язку;
- часовий – імпульси посиляються послідовно за часом і фіксуються на стороні приймача в порядку їх проходження;
- частотний – імпульси посиляються паралельно, але вони мають різне частотне заповнення і відокремлюються на стороні приймача за допомогою фільтрів;
- частотно-часовий – імпульси посиляються послідовно ті паралельно в часі.

Для синхронізації роботи передавача та приймача в сигнал вміщується синхроімпульс (маркер), що відрізняється певною ознакою від інших імпульсів.

Методи вибору сигналів визначаються методами відокремлення та поділяються на:

- циркуляційні – частотний, розподільний (при часовому відокремленні), частотно-розподільний. Застосовують при передачі команд і сигналізації стану об'єкту;
- не циркулярні (комбіновані) – інформацію про стан об'єкту несе весь сигнал, що складається із комбінації імпульсів. Вони бувають – частотно-комбінаційними, розподільно-комбінаційними, частотно-комбінаційно-розподільними. Застосовують комбінаційні методи у випадку, коли треба вимірювати тільки одне значення параметра за один цикл.

5.4 Канали зв'язку

Канал зв'язку – сукупність пристроїв та фізичного середовища, що передають сигнал на відстань. В нього входять лінії зв'язку, підсилювачі та допоміжні пристрої.

Лінія зв'язку – фізичне середовище, що поєднує передавачі та приймачі сигналів.

В системах телемеханіки використовують кабелі, повітряні лінії зв'язку, лінії електропередач високої напруги та радіолінії. На одній лінії зв'язку можна утворити ряд каналів зв'язку за допомогою різних методів відокремлення сигналів.

За каналом зв'язку інформація передається у вигляді напруги або струму. При цьому вона повинна проходити швидко, без перешкод і спотворень (спотворення виникають при наявності в каналах зв'язку активного, індуктивного або ємнісного опору, що змінюється в залежності від різних причин та умов).

Канал зв'язку, за яким сигнал передається в одному напрямку називається одностороннім або *сімплексним*. Застосовують при телеграфуванні, телебаченні, телемеханіці.

Канал зв'язку, за яким сигнал передається в обидва напрямки одночасно називаються двостороннім або *дуплексним*.

Канал зв'язку, що забезпечує передачу сигналу в обох напрямках, але з відокремленням в часі (навперемінно) називаються *напівдуплексним*.

В залежності від призначення канал зв'язку поділяються на телеграфний, телефонний, телемеханіки, телебачення, для передачі літерно-цифрової, виробничо-технічної та іншої інформації.

5.5 Пристрої телемеханіки та їх принципи

Можуть бути:

- однофункціональними – виконують одну функцію – телевимірювання, телекерування або телесигналізації.
- Багатофункціональними – одночасно виконують функції телекерування, телесигналізації та телевимірювання. В таких системах більш економічно працюють канали зв'язку.

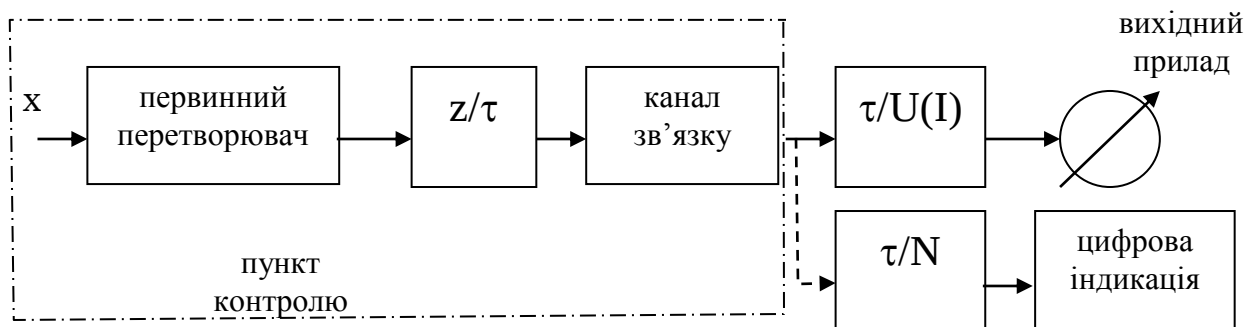
а) принципи телевимірювання

Системою телевимірювання називається сукупність пристроїв на сторонах передавання та приймання і каналу зв'язку, що здійснюють автоматичне вимірювання на відстані один або декілька параметрів, що контролюються. Телевимірювання здійснюється без безпосередньої участі людини.

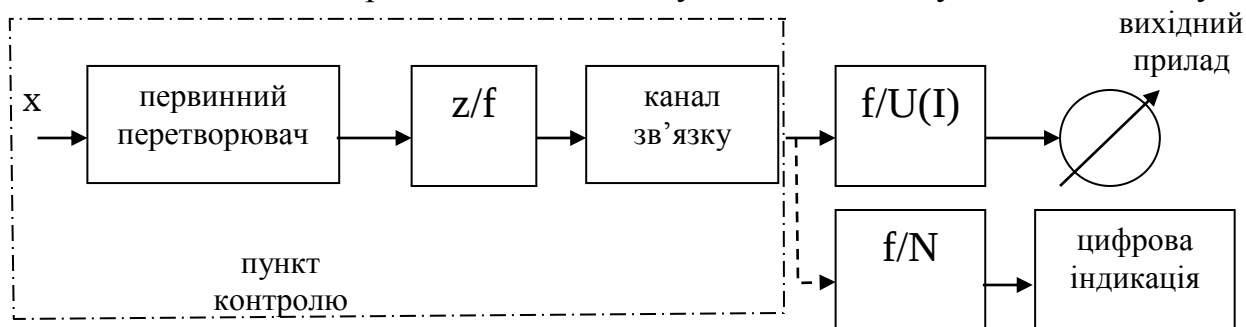
В телемеханіці застосовують чотири групи пристроїв телевимірювання за видом модуляції:

- *інтенсивні* (найперші системи) – величина, що вимірюється перетворюється в напругу постійного струму та передається за лінією зв'язку;

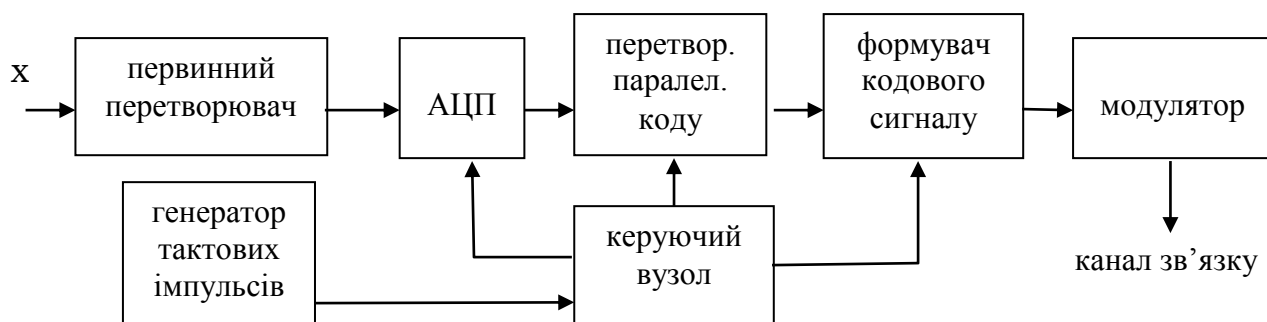
- *часово-імпульсні* (аналогові) пристрої – складаються з пристроїв з широтною та часово-імпульсною модуляцією, в якому величина, що вимірюється, пропорційна часовому інтервалу;



- *частотні* - складається з пристроїв частотної та частотно-імпульсної модуляції, в яких величина, що вимірюється, пропорційна або функціонально пов'язана з частотою гармонійного або імпульсного сигналу в каналі зв'язку.



- *кодо-імпульсні* – перетворюють сигнал в цифрову форму проводиться аналогоцифровим перетворювачем на стороні, що передає, а в каналі зв'язку передаються імпульсно-кодові комбінації;



Для передачі за каналом зв'язку, паралельний код перетворюється в послідовний шляхом зчитування кодових комбінацій з елементами пам'яті або пересуванням регістру з заданою швидкістю з записаним кодом. З формувача кодів здійснюється подача синхросигналу.

б) *принципи телеконтролю та телесигналізації.*

- двоступінчасте – оператор вибирає об'єкт керування, а потім надсилає команду керування різними ключами. При цьому зменшується ймовірність

надсилання невірної команди. Після подачі команди оператор повинен отримати сигнал про виконання операції;

- принцип ієрархічності – оснований на розділі інформації керування за певним рівнем, що дозволяє створити багатоступеневу систему телеконтролю-телесигналізації. В центральний диспетчерський пункт поступає лише найважливіша інформація про об'єкт;

- циркуляційне керування – характеризується одночасною передачею протягом одного циклу багатьох команд, тобто здійснити керування багатьма об'єктами. Кількість команд залежить від вимог технологічного процесу;

- циклічне опитування – по чергове зчитування інформації про стан всіх або групи об'єктів. Опитування може бути спорадичним (за необхідністю) або автоматичним. Об'єкти можуть під'єднуватись до оператора також і за заданою програмою.

Розрізняють види сигналізації:

1. Сигналізація про стан об'єктів і системи здійснюється за викликом або автоматично. Вона завжди адресна. Крім сигналізації за станом об'єкту, передбачається сигналізація про справну роботу окремих агрегатів каналу зв'язку.

2. Сигналізація, що свідчить про виконання команд телекерування (повідомна сигналізація).

3. Сигналізація, що свідчить про перевищення заданої межі (попереджувальна сигналізація). Сюди відноситься і аварійна сигналізація.

4. Сигналізація за методом “світлого” та “темного” щитів. Лампочка горить до тих пір доки об'єкт ввімкнутий (“світлий щит”).

Сигналізація може бути спорадичною або циклічною.

Методи побудови телеконтролю-телесигналізації основані за функціями, що вони виконують і створені загальними установками.

В телемеханіці застосовують такі групи пристроїв телеконтролю-телесигналізації:

- багатопровідні – застосовують при порівняно невеликій довжині багатожильних кабельних ліній зв'язку (до 2...5км) для розосереджених об'єктів;

- частотні з спорадичною передачею та вибиранням об'єкту або частоти, або двома паралельними, або послідовними частотами, що передаються, для невеликих розосереджених об'єктів;

- циклічні з часовим відокремленням елементів сигналів з кодом для передавання команд на об'єктах, що зосереджені на одному контрольному пункті;

- цифрові (кодові) з спорадичним адресним передаванням сигналів телекерування-телесигналізації.

Застосування електронно обчислювальних машин розширює можливості телемеханіки.

6.0 НАДІЙНІСТЬ АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

Питання надійності регламентуються державними стандартами.

Надійність – властивість виробу виконувати задані функції, зберігаючи свої експлуатаційні показники в зазначених межах протягом потрібного проміжку часу. Вона характеризується такими показниками:

1. Працездатність – це такий стан виробів, коли вони здатні виконувати зазначені функції відповідно до основних і другорядних параметрів, встановлених вимогами нормативнотехнічної документації.

2. Безвідмовність – це властивість елементу або виробу бути безперервно роботоздатним протягом деякого часу (наробітку).

3. Довговічність – це властивість пристрою зберігати роботоздатність аж до самого досягнення граничного стану (з урахуванням необхідності перерв на технічне обслуговування та ремонт). Кількісно довговічність визначається наробітком, тобто часом експлуатації встановленого технічною документацією в годинах, або обсягом виконаної роботи в іменованих одиницях.

4. Ремонтнопридатність – це пристосованість виробу до попередження та знаходження причин відмов та до усунення несправностей проведенням технічного огляду та ремонту.

5. Здатність до зберігання – це властивість виробу безперервно зберігати обумовлену нормативнотехнічною документацією експлуатаційних показників під час зберігання та транспортування. Строки зберігання та відстані транспортування регламентуються.

Відмова – визначається як подія, що характеризується порушенням роботоздатності виробу. В залежності від характеру зміни параметрів пристрою розрізняють відмови:

- раптові – виникають внаслідок стрибкоподібної зміни одного або кількох основних параметрів пристрою (від коротких замикань, пробою ізоляції);
- поступові – виникають внаслідок повільного погіршення параметрів виробу як результат спрацювання та старіння окремих його елементів;
- короточасні – поява перешкод у мережах зв'язку, джерелах живлення.

Безвідмовність характеризується рядом кількісних показників:

а) імовірність безвідмовної роботи $p(t)$ – означає можливість того, що у визначені інтервали часу не виникне відмова виробів:

$$p(t) = \exp(-k\lambda t),$$

де k – коефіцієнт який враховує вплив навколишнього середовища: для лабораторних умов $k=1$; для сільського господарства – 10...15; для мобільних агрегатів – 25...30.

λ - інтенсивність відмов.

[Ймовірність відмов $q(t) = 1 - p(t)$]

Наближено $p(t)$ визначається за формулою:

$$p(t) = N(t)/N_n,$$

де $N(t)$ – кількість виробів, що залишились робото здатними до кінця виробітку;

N_n - початкова кількість виробів.

б) інтенсивність відмов - $\lambda(t)$ – імовірність відмови елементу та виробів (що не ремонтуються) в одиницю часу:

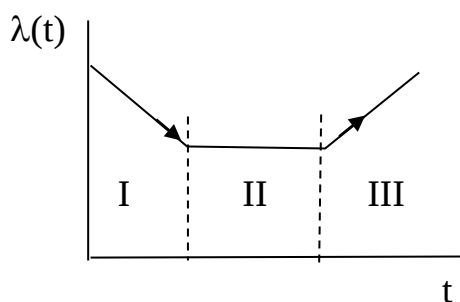
$$\lambda(t) = \Delta N / N_c \Delta t ,$$

де $\Delta N = N_n - N_k$ – число виробів, що відмовили за час Δt ;

N_n , N_k – кількість справно працюючих виробів на початку та в кінці проміжку часу Δt , коли проводились спостереження;

$N_c = 0,5(N_n + N_k)$ – середня кількість працюючих виробів за час спостережень.

Інтенсивність відмов (λ) – випадкова величина і визначається на основі статистичних даних про тривалість справної роботи:



I – пропрацьовування;
II – нормальна робота;
III – етап спрацьовування.

в) наробіток на відмову (T) – середнє значення наробітку виробу між двома послідовними відмовами:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}$$

де n – число відмов виробу за час спостережень;

t_i – час справної роботи виробу між $i=1$ та i -тою відмовами.

Технічний ресурс дорівнює сумі всіх наробітків пристрою від початку експлуатації (нового або відремонтованого виробу) до моменту граничного стану.

Строк служби – календарна тривалість експлуатації до виникнення граничного стану.

При *послідовному* з'єднанні n елементів *імовірність безвідмовної роботи* системи визначається добутком:

$$p(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^n k\lambda_i t\right)$$

де λ_i – інтенсивність відмов i -того елементу.

При *паралельному* з'єднанні m елементів *імовірність безвідмовної роботи* системи визначається:

$$p(t) = 1 - \prod_{i=1}^m [1 - p_i(t)]$$

При *змішаному* з'єднанні (n послідовних груп з m паралельних елементів):

$$p(t) = \prod_{i=1}^n \left\{ 1 - \prod_{j=1}^m [1 - p_j(t)] \right\}$$

Надійність залежить від проектування, монтажу та експлуатації установок.

7.0 ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ

7.1 Загальні питання при розробці систем автоматики

7.1.1 Послідовність розробки систем автоматики

1. Розробка завдання на проектування. В ньому вказується мета та призначення системи, що розробляється, а також вказують її функціональні можливості. Вихідні дані повинні бути достатніми для розрахунку всіх елементів системи, що проектується.

2. Складання структурної схеми керування об'єктом, а також її функціональної схеми автоматизації. За функціональною схемою (основний документ) проводять аналіз об'єкту (визначають його параметри контролю, сигналізації, керування), а також попередньо намічають комплекти приладів і засобів автоматизації.

3. Побудова математичної моделі. Методи – аналітичний або експериментальний. За допомогою моделі отримують передаточну функцію об'єкту, що є основою для вибору оптимального алгоритму керування об'єкту.

4. Вибір технічних засобів реалізації алгоритму керування.

5. Розробка принципових схем (електричних).

6. Вибір пристроїв електроживлення, проводів кабелів, апаратів захисту та керування.

7. Вибір щитів та пультів, визначення необхідності побудови мнемосхем.

8. Проектування пристроїв заземлення.

9. Розрахунок надійності (при необхідності розрахунок резервних елементів) та економічної ефективності систем автоматики.

7.1.2 Схеми, що застосовуються в проектах технологічних процесів

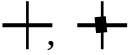
Типи схем:

- структурні;
- функціональні;
- принципові;
- з'єднань;
- підключень;
- загальна;
- розташувань;
- інші;
- об'єднані.

1. *Структурні* – зображають основні підрозділи об'єкту автоматизації з показом їх найменувань, місцеві щити та пульти керування, контролю, основні вузли систем керування з показом напрямку передачі інформації або дії.

2. *Функціональні* – це креслення, на яких умовними позначеннями зображене технологічне обладнання, трубопроводи, контрольно-вимірювальні прилади та засоби автоматизації з показом зв'язків між ними. Допоміжні пристрої (реле, автомати, запобіжники та ін.) на схемах не показують.

Прилади та засоби автоматизації відображають на функціональних схемах за допомогою *графічних* позначень:

-  - прилад, що встановлюється за місцем;
-  - прилад, що встановлюється на щиті;
-  - виконавчий механізм;
-  - регулюючий орган, що відкривається після зняття подачі сигналу;
-  - регулюючий орган, що закривається після зняття подачі сигналу;
-  - регулюючий орган з додатковим ручним приводом;
-  - лінії зв'язку, відповідно без з'єднань та з з'єднанням.

Літерні позначення на функціональних схемах автоматики

(позначення поділяються - для вимірювання величин - *ВВ*;
- для функціонального призначення – *ФВ*)

А – сигналізація (ФВ);	Л – рівень (ВВ);
С - регулювання, керування (ФВ);	М - вологість (ВВ);
Д - густина (ВВ);	Р – тиск, вакуум (ВВ);
Е - електрична величина (ВВ);	Q – концентрація, склад (ВВ);
Ф - витрати (ВВ);	Р – радіоактивність (ВВ);
Г - розмір, положення (ВВ);	Ѕ – швидкість, частота (ВВ), вмикання – вимикання (ФВ)
Н – ручна дія (ВВ), верхня межа передача інформації (ФВ);	Т – температура (ВВ), дистанційна передача інформації (ФВ);
І - показ величини (ФВ);	U – декілька різнорідних величин, що вимірюються (ВВ);
Ј - автоматичне перемикавання (ВФ);	V- в'язкість (ВВ);
К – час, часова програма (ВВ);	W – маса (ВВ).

Функціональні схеми виконують як спрощеним (не показують допоміжну апаратуру та первинні перетворювачі), так і розгорнутим способом (необхідно конкретизувати функцію кожного приладу та засобів автоматизації).

Для розподілу контурів обладнання та пристроїв, застосовують лінії різної товщини: технологічне обладнання – 0,6...1,5 мм (щити, пульти); прилади – 0,5...0,6 мм; лінії зв'язку – 0,2...0,3 мм.

3. *Принципові схеми* – визначають повний склад електричних елементів і зв'язок між ними, а також дають детальну уяву про принципи роботи схеми.

В загальному випадку принципова електрична схема автоматизації містить:

- умовне зображення елементів і зв'язки між ними;
- пояснюючі написи;
- частини схем, що використовуються з інших схем;
- діаграми перемикачів контактів багато позиційних пристроїв;
- перелік апаратів, приладів, що використані в схемі;
- перелік креслень, що відносяться до даної схеми, загальне пояснення та додатки.

Літерні коди найбільш поширених елементів

Групи видів елементів	Види елементів
1	2
В – перетворювачі неелектричних величин в електричні або навпаки	ВА – гучномовці; BF – телефон; BK – термopapa; BL – фотоелемент; BM – мікрофон; BP – датчик тиску; BQ – п'єзоелемент; BV – датчик швидкості; BR – датчик частоти обертання.
С - конденсатори	
D – логічні елементи, мікросхеми	DS – зберігання інформації; DT – затримка; DA – інтегральна аналогова схема; DD – інтегральна цифрова схема.
Е – різні елементи (нагрівальні, освітлювальні)	EK – нагрівальні елементи; EL – освітлювальні лампи.
F – розрядники, запобіжники, пристрої захисту	FV – захист від перенапружень; FA – захист від струму миттєвої дії; FP - захист від струму інерційної дії; FU – плавкий запобіжник; FR – розрядний елемент.
G – генератори, джерела живлення	GB – батарея
H – індикація, сигнальні елементи	HA – прилад звукової сигналізації; HL – прилад світлової сигналізації
K – реле, контакт, пускачі	KH – вказуючі реле; KA – струмові реле;

	КК – електротеплові реле; КМ – контактор, магнітні пускачі; КР – поляризовані реле; КV – реле часу.
1	2
L – котушка індуктивності	LL – дроселі люмінесцентних ламп освітлення
M – двигуни постійного або змінного струму	
P- прилади (позначення PE – не допускається)	PA – амперметр; PC – лічильник імпульсів; PF – частотомір;
	PK – лічильник реактивної енергії; PJ – лічильник активної енергії; PR – омметр; PT – вимірювач часу; PV – вольтметр; PW – ватметр.
Q – вимикачі та роз'єднувачі силових кіл	QF – автоматичний вимикач, короткозамикач; QS – роз'єднувач.
R - резистори	RK – терморезистори; RP – потенціометр; RS – шунт виміру; RU – варистор.
S – комутаційні пристрої в колах керування, сигналізації	SA – вимикач або перемикач; SB – вимикач кнопковий; SF – автоматичний вимикач; Вимикачі від дії: SL – рівня; SP – тиску; SQ – шляху; SR – швидкості; SK – температури.
T–трансформатори, автотрансформатори	TA – трансформатори струму; TV – трансформатори напруги.
U – пристрої зв'язку, перетворювачі електричної величини в електричну	UB – модулятор; UZ – частотний перетворювач.
V–електровакуумні, напівпровідникові прилади	VD – діоди, стабілітрони; VL – електровакуумні прилади; VT – транзистори.
W – лінії та елементи надвисоких частот	WA – антени

1	2
Х – контакти з'єднання	ХА – струмозняття (щітки); З'єднання роз'ємне: ХР – штир; ХS – гніздо; ХТ – розбірне гніздо; ХSG – гніздо для випробувань.
У – механічні пристрої з електромагнітним приводом	УА – електромагніт; УВ – гальма з електромагнітним приводом; УС – муфта з електромагнітним приводом.

Принципові схеми виконуються стрічним методом. Всі елементи зображаються у вимкнутому стані. Контакти реле зображаються так, якби сила діяла зверху вниз або зліва направо. Написи можуть бути дво- або однолітерні. Лінії зв'язку повинні мати найменшу кількість зломів (горизонтальних і вертикальних). Силові кола змінного струму маркуються літерами А, В, С, N.

4. *Схеми з'єднань* – це схеми, на яких зображають з'єднання складових частин установок, що автоматизуються, а також показують проводи, кабелі, трубопроводи.

Схеми з'єднань користуються при монтажі, наладці при експлуатації.

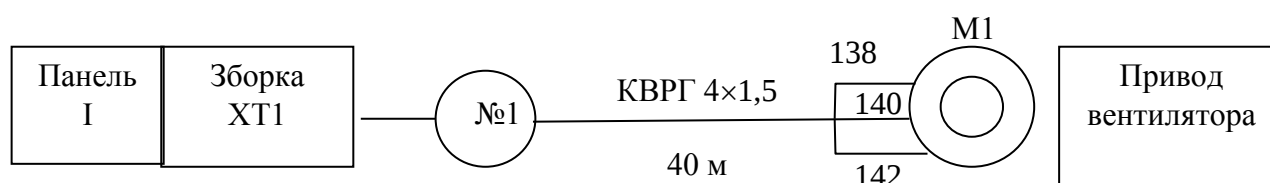
Загальні правила виконання схем:

- схеми розробляються на один пульт, щит, станцію керування;
- типи апаратів принципів схем повністю відображаються на схемах з'єднань;
- позначення на принципів схем залишається і в схемах з'єднань.

Застосовують три способи складання схем з'єднань:

- графічний – на кресленнях умовними лініями показують всі з'єднання між елементами апаратів;
- адресний – лінії зв'язку між окремими елементами не показують; на входах і виходах проставляють відповідні номери – зустрічний монтаж (найбільш поширений метод);
- табличний – складається таблиця, де вказуються позначення елементів, № проводу, звідки йде і куди приходить.

5. *Схеми підключень* – показують зовнішнє під'єднання апаратів, установок, щитів, пультів.



7.2 Вибір технічних засобів автоматики

1. Вибір контрольно-вимірювальних приладів.

Вибирають прилади, що випускаються серійно. При виборі враховують:

- параметри середовища, що керується і в якому працює прилад (температура, тиск, вологість, запиленість, вібрація та ін.);
- рівень і характер величини, що контролюється;
- відстань між точками виміру та вторинними приладами;
- наявність механічної дії (удари, вібрація);
- наявність джерел живлення.

Контрольно-вимірювальні прилади забезпечують технологічні норми в межах яких повинен знаходитись параметр, що керується, об'єкту. Користуються наступними метрологічними показниками:

- для контролю та регулювання виробничих процесів з високим ступенем точності – застосовують прилади класу точності 0,2 (похибка $\pm 0,2\%$). Ширина поля запису 250 мм;
- для контролю та регулювання виробничих процесів з середнім ступенем точності – застосовують прилади класу точності 0,5 (похибка $\pm 0,5\%$). Ширина поля запису 160 мм;
- для мнемосхем, пультів, пунктів контролю та сигналізації (не високої точності) – клас точності 1 ($\pm 1\%$). Ширина поля запису 100 мм;
- шкали приладів вибирають такі, щоб значення величини, що вимірюється, вкладались в другу половину або в останню третину шкали.

При виборі враховується інерційність приладу (повинна бути меншою ніж інерційність об'єкту) - $T_{\text{вим.прил}} \leq (0,2 \dots 0,3) T_{\text{об.}}$

2. Вибір датчиків

До датчиків висувають наступні вимоги:

- лінійність і однозначність статичної характеристики (не лінійність не перевищує $0,1 \dots 0,3\%$);
- висока чутливість (крутизна);
- стабільність характеристик в часі;
- швидкодія;
- стійкість до хімічної дії навколишнього середовища та того, що контролюється;
- висока здатність до перевантажень;
- взаємозаміна однотипність пристроїв;
- мінімальна зворотна дія на параметр, що контролюється;
- простота монтажу та обслуговування.

Датчики вибираються в два етапи:

перший – за родом параметра, що контролюється, вибирають різновид датчика;

другий – за каталогом знаходять його типорозмір.

Датчики підбирають таким чином, щоб величина, що вимірюється, знаходилась в межах $1/3 \dots 2/3$ діапазону його виміру.

3. Вибір виконавчих механізмів

Вибір соленоїдних приводів зводиться до розрахунку котушки електромагнітів за напругою та тяговим зусиллям.

Електродвигунні виконавчі механізми вибираються в залежності від значення моменту необхідного для повороту заслінок ($M_d \geq M_3$).

4. Проектування пристроїв електроджерел систем автоматики

При проектуванні схем і систем електроживлення розробляють такі питання:

- вибір і обслуговування схем електроживлення, роду струму, значення напруги та потужності джерела (в системах контрольно-вимірювальних приладів та автоматики доцільно застосовувати таку ж напругу як і для електроживлення об'єкту без додаткового перетворення);
- розрахунок і вибір апаратури керування та захисту кіл живлення;
- вибір і розрахунок систем освітлення щитів і пристроїв електроживлення;
- вибір систем живлення електроінструментів для виконання монтажних і ремонтно-експлуатаційних робіт);
- розрахунок перетинів і вибір марок проводів, що живлять розподільчі мережі;
- вибір способу прокладки електропроводок проводами та кабелями.

Схеми електроживлення поділяються на *живлячу* (лінія від джерела живлення до щита) та *розподільчу* (лінія від щита до електроспоживача) мережу.

В залежності від розташування щитів живлення контрольно-вимірювальної апаратури та автоматики мережі можуть бути:

- *радіальними* – застосовують в тих випадках, коли щити живлення розташовують в різних напрямках від джерела та відстань між щитами більша, ніж від джерела до щита;

- *магістральними* – використовуються для електроживлення групи щитів, якщо відстань між ними значно менша відстані до джерел живлення. Бувають з одно- та двостороннім живленням;

- *радіально-магістральні*.

Розподільчі мережі захищають тільки від струмів короткого замикання.

При виборі автоматичних вимикачів дотримуються таких вимог:

$$U_{ав} \geq U_{мер}; \quad I_{Н.роз} > I_{спож}; \quad I_{Н.авт} > I_{спож}; \quad I_{макс. авт} \geq I_{3-ф. к.з.}$$

При виборі запобіжників:

$$U_{зап} \geq U_{мереж}; \quad I_{макс зап} \geq I_{3-ф.к.з.}; \quad I_{зап} \geq I_{спож};$$

$I_{плав встав} = I_{пуск}/\alpha$, $\alpha=2,5$ – нечасті пуски (5...10с); $\alpha=1,6...2,0$ – важкі пуски (10...40с).

Перетин проводів мереж систем живлення вибирається з умов нагрівання електрострумом та за механічною міцністю з подальшою перевіркою за втратою напруги. Кабельні проводки прокладають відкрито, а також в сталених лотках, коробах і каналах. Застосовують проводи з алюмінієвими та мідними жилами.

5. Проектування щитів і пультів.

Щити систем автоматики поділяють:

- *за виконанням* – на відкриті (панельні) і захищені (шафні);

- *за призначенням* – на оперативні (ведеться контроль та керування технологічним процесом) та неоперативні (безпосередньо не використовуються оператором);
- *за місцем установки:*
 - а) місцеві (біля автоматизованої установки);
 - б) агрегатні (апаратура для одного агрегату);
 - в) блочні (апаратура декілька агрегатів);
 - г) центральні (апаратура всього технологічного процесу);
 - д) допоміжні (щити з лічильниками, з живленням).

Прилади та апаратура на лицьовій стороні щита і пульта розміщують з умов ефективної роботи оператора та його безпеки. Апаратура, яка виділяє багато теплоти (резистори, лампи) розміщується в верхній частині щитів. Апаратура з рухомими струмоведучими частинами розташовується так, щоб вони не могли самостійно замкнути коло під дією власної маси.

Для електропроводки щитів і пультів застосовують проводи з мідними жилами.

Підлога в щитовій повинна бути не електропровідною. Норма освітленості при штучному освітленні 550...1100 лк (при зчитуванні приладів), 220...550 лк – при веденні записів, 100 лк – при ремонті, 20...50 лк – в проходах.

6. Проектування пристроїв заземлення

Заземленню підлягають металеві частини установок, що безпосередньо на знаходяться під напругою, але в любий час на них може з'явитися небезпечний для життя рівень напруги.

Не треба заземляти:

- корпуси приладів, що стоять на металевих заземлених щитах;
- корпуси електроспоживачів, що виконані повністю із діелектрика.

В мережах з глухо заземленою нейтраллю використовують як заземлення провідники: нульові проводи, сталі труби електропроводок, алюмінієві оболонки кабелів. При цьому забороняється застосовувати нульові проводи для заземлення однофазних електроспоживачів. Забороняється використовувати як заземлення свинцеві оболонки кабелів, метало рукави, металеві конструкції коробів і лотків, так як вони самі повинні бути заземлені. Мінімумально допустимий перетин мідних заземлювачів складає 1 мм², алюмінієвих – 2,5 мм².

Література для детального вивчення курсу:

1. *И.И.Мартыненко, Б.Л.Головинский, Р.Д.Проценко, Т.Ф.Резниченко* Автоматика и автоматизация производственных процессов.- М.: Агропромиздат, 1985г. -335с.
2. *И.Ф.Бородин* Основы автоматики. – М.: «Колос», 1970г. -327с.
3. *А.А.Воронов, В.К.Титов, Б.Н.Новогренов* Основы теории автоматического регулирования и управления . –М.: «Высшая школа», 1977г. – 519с.
4. *В.А.Бесекерский, Е.П.Попов* Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1972г. – 768с.
5. *Н.И.Бохан, Р.И.Фурунжиев* Основы автоматики и микропроцессорной техники. Минск: «Ураджай», 1987г. – 376с.
6. *А.С.Клюев* Автоматическое регулирование. М.: Энергия, 1973г. – 392с.
7. *Н.И.Бохан, И.Ф.Бородин, Ю.В.Дробониев* Средства автоматики и телемеханики. М.: Агропромиздат, 1992г. – 352с.
8. *А.В.Колесов* Основы автоматики.- М.: Колос, 1984г. -228с.