

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

О.І. Акілов

НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК

**СИСТЕМИ І ЗАСОБИ АВТОМАТИЧНОГО
РЕГУЛЮВАННЯ**

для студентів спеціальності 7.090202 усіх форм навчання

СУМИ ВИД-ВО СУМДУ 2005

ВСТУП

«Системи автоматичного керування і регулювання» - найбільша і одна з трудомістких тем курсу "Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні". Для її освоєння необхідно знати розділи диференціального та інтегрального числення, диференціальні рівняння, комплексні змінні з курсу математики, а також розділи динаміки з курсу "Теоретична механіка". Необхідно знати, що система автоматики утворюється приєднанням автоматичних пристроїв до об'єкта автоматизації. Вхідними сигналами об'єкта є збуджуючі і регулюючі діяння. Студент повинен добре розбиратися в структурних схемах систем автоматизації, уявляти призначення зворотних зв'язків.

Математичний опис і аналіз системи здійснюють шляхом умовного розчленування її на ланки і зображення у вигляді диференціального рівняння чи системи рівнянь, що встановлюють кількісні чи логічні залежності. При цьому незалежно від інших ознак системи можуть бути лінійними або нелінійними. Найчастіше статичні характеристики окремих елементів системи автоматичного керування нелінійні, тобто не зображуються відрізком прямої. Якщо при використанні даної характеристики для аналізу системи досить розглянути лише малі відхилення параметра поблизу робочої точки, то криву заміняють дотичною до неї у цій точці. Це називають лінеаризацією характеристики.

Розв'язання системи диференціальних рівнянь високого порядку становить велику складність, а в більшості випадків неможливе. Для полегшення цієї задачі застосовують метод перетворення Лапласа-Карсона, який базується на тому, що шукані функції заміняють їх зображеннями, використовуючи перетворювач Лапласа. Використання перетворення дозволяє такі трудомісткі операції, як диференціювання й інтегрування функцій часу за нульових початкових умов, замінити відповідно діленням і множенням на оператор Лапласа. Розділивши зображення вихідної величини на зображення вхідної, одержують передатну функцію розглянутої системи. Метод Лапласа застосовується для лінійних функцій з постійними коефіцієнтами. Він не дає уявлення про критерій якості системи, але дозволяє використовувати інші методи. Відомості якості найбільш просто визначаються з кривої перехідного процесу, яка утворюється на виході системи при подачі на вхід ступінчастого впливу. Залежно від характеру проходження перехідного процесу розрізняють такі типові ланки системи автоматичного

регулювання (САР): безінерційні, аперіодичні, диференціальні, інтегральні, коливальні.

Під час аналізу стійкості системи автоматичного регулювання застосовуються частотні методи дослідження, коли на вхід подається синусоїдальний сигнал. Співвідношення між вхідними і вихідними коливаннями записуються за допомогою передатних функцій у частотній формі запису, що одержують заміною оператора Лапласа P на $j\omega$. Розрізняють фазові частотні (ФЧХ), амплітудні частотні (АЧХ) і амплітудно-фазові (АФЧХ чи АФХ) характеристики.

При вивченні тематики призначень і конструкцій функціональних блоків, що входять у структурну схему системи автоматики, слід особливу увагу звернути на сприймаючі (СП) пристрої (первинні перетворювачі - датчики), проміжні - керуючі (КП) пристрої, задатчики (З) і виконавчі пристрої (ВП).

СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

1 Принципи регулювання

Автоматичним регулюванням називається зміна якої-небудь фізичної величини за вимогами закону безпосередньої участі людини. Автоматичне регулювання є окремим випадком автоматичного керування. В реальних об'єктах регулювання (ОР) завжди існують причини, які відхиляють регульовану величину від необхідного закону зміни. Ці причини називаються збурюючими впливами $f(t)$.

Для боротьби зі збурюваннями об'єкт регулювання звичайно обладнують регулювальним органом (РО), впливаючи на який вручну чи автоматично можна змінювати регульовану величину $y(t)$. Цей вплив називається регулюючим впливом $x(t)$ (рис. 1).

За принципом регулювання системи поділяються на:

- регулювання за збуренням;
- регулювання за відхиленням.
- Принцип регулювання за збуренням був запропонований французьким вченим Понселе і вперше реалізований у другій половині XIX ст. відомим російським електромеханіком В.М. Чиколевим у розроблених ним регуляторах сили світла дугових ламп.

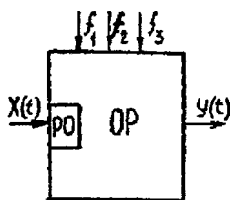


Рисунок 1

Основною причиною, що відхиляє регульовану величину від необхідного закону її зміни, є різноманітні збурюючі впливи. У зв'язку з цим доцільно виміряти ці збурення і залежно від результату вимірювання, здійснити регулюючий вплив на об'єкт.

Розглянута ідея і становить зміст принципу регулювання за збуренням. Для його технічної реалізації до складу автоматичного регулятора, очевидно, повинні входити пристрої, що дозволяють вимірювати збурюючі впливи (датчики) і пристрої, призначені для створення регулюючого впливу на об'єкт регулювання (виконавчі елементи). Між датчиком і виконавчим елементом повинен бути встановлений проміжний (керуючий елемент), призначений для посилення вихідного сигналу датчика.

Функціональна схема САР, що реалізує принцип регулювання за збуренням, зображена на рисунку 2.

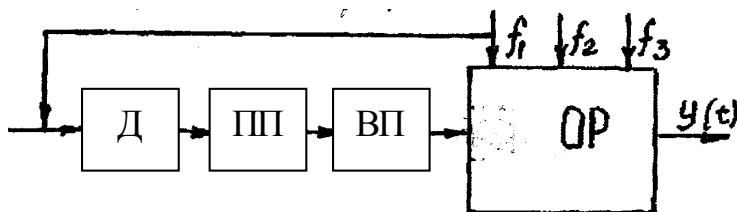


Рисунок 2 – Функціональна схема САР:

Д – датчик; ПП – підсилювальний пристрій; ВП – виконавчий пристрій

При цьому важливо виділити основний збурюючий вплив, який найбільш сильно впливає на регульовану величину.

Розглянемо приклад регулювання тиску повітря всередині герметизованого відсіку (рис. 3).

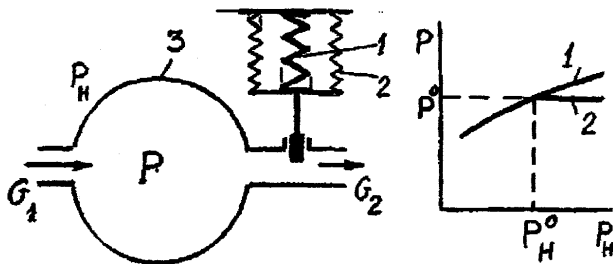


Рисунок 3 - Принципова схема регулювання за збуренням

Одним з основних збурювань для герметизованого відсіку є зміна тиску навколишнього середовища P_n , яка характеризується кривою 1. З рисунка 3 бачимо, що у відсіку без регулятора необхідний тиск P_0 має місце при єдиному тиску зовнішнього середовища P_n^0 . При $P_n \neq P_n^0$ тиск у відсіку буде відрізнятися від необхідного P^0 . Регулятор дозволяє забезпечити незалежність регульованої величини P від тиску P_n .

Для вимірювання збурюючих впливів P_n у регуляторі використовується вимірювач тиску, що складається із сильфона 2, всередині якого розміщена пружина 1. Сильфон являє собою тонкостінну гофровану оболонку, повітря з якої викачане до величини технічного вакууму. Деформація сильфона пропорційна величині тиску P_n . Пружина 1 використовується для збільшення пружності сильфона. З дном сильфона жорстко зв'язана заслінка у вихідному трубопроводі (проміжні і виконавчі елементи в регуляторі відсутні). Нехай положення заслінки регулятора відповідає номінальному тиску у відсіку, коли $P=P^0$. Припустимо, що тиск P_n зріс. За відсутності регулятора це привело б до зменшення витрат повітря на виході G_2 і збільшення тиску у відсіку. За наявності регулятора збільшення P_n приведе до стискування сильфона і переміщення регулюючої заслінки вгору. У результаті витрата зросте і тиск у відсіку збереже колишнє значення P^0 . При зниженні тиску P_n сильфон розширюється і регулююча заслінка переміщується вниз, зменшуючи витрату повітря G_2 . Залежність тиску P від величини P_n для регульованого об'єкта показана кривою 2. Розглянутий регулятор забезпечує інваріантність тиску P тільки стосовно до тиску навколишнього середовища P_n . На інші впливи цей регулятор ніяк не реагує.

Недоліки САР, що працюють за збуренням:

- САР реагує тільки на ті збурюючі впливи, що вимірюються чутливим елементом. Наявність великої кількості інших, не контрольованих регулятором збурюючих впливів (f_2, f_3) приводить звичайно до того, що регульована величина значно відрізняється від необхідного закону її зміни, тобто задача регулювання не завжди виконується. Спроба створення окремого регулятора для кожного збурення приводить до різкого ускладнення САР.

- Інваріантність відносно збурення, вимірюваного чутливим елементом регулятора у розглянутих САР, забезпечується тільки за умови строгої відповідності параметрів регулятора й об'єкта їх розрахунковим значенням. У випадку зміни параметрів (внаслідок старіння пружини й інших причин) відбувається відхилення регульованої величини від заданої.

Через відзначені недоліки системи регулювання за збуренням, що працюють за розімкненим циклом, у наш час самостійно майже не застосовуються. Звичайно вони використовуються тільки як складова частина більш складних, так званих комбінованих САР.

Принцип регулювання за відхиленням (помилкою) здійснений на практиці вперше у 1765 р. відомим російським механіком І.І.Ползуновим у регуляторі рівня води в котлі парової машини.

Основна задача САР полягає у виконанні рівності

$$Z(t) = X(t) - Y(t) .$$

Функція $Z(t)$ визначає помилку роботи САР. Чим менша Z , тим краща система. При ідеальній роботі САР

$$Z(t) = 0.$$

Принципова схема регулювання тиску повітря в резервуарі зображена на рисунку 4. Зі зміною тиску повітря в резервуарі під дією зовнішніх факторів він змінюється також у камері 3, тому що ці ємності сполучені між собою. При цьому сильфон 1 деформується, переміщаючи заслінку в потрібному напрямку (рис. 4).

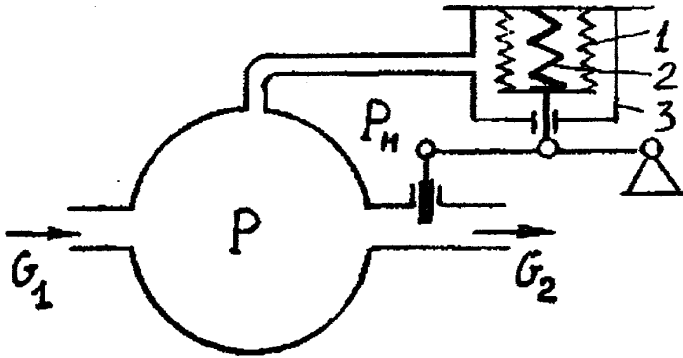


Рисунок 4 - Принципова схема регулювання за відхиленням:
1 - сильфон; 2 - пружина; 3 - камера

2 Структура системи автоматичного регулювання (САР)

Автоматичне регулювання технологічних процесів має певну мету. У металообробці, наприклад, прагнуть забезпечити оптимальні режими чи одержати максимальну продуктивність при забезпеченні необхідної точності. Створення систем регулювання, що відповідають поставленій задачі, є складною проблемою, вирішення якої здійснюється методом послідовних наближень і зводиться до таких етапів:

- принципове розв'язання структури системи;
- створення математичної моделі системи автоматичного регулювання;
- аналіз моделі в установленому і перехідному режимах роботи;
- подальша її оптимізація, синтез.

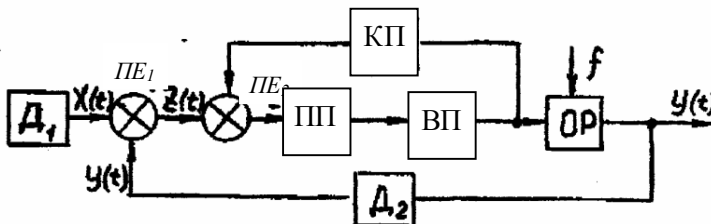


Рисунок 5

На першому попередньому етапі при розробленні структури прагнуть задовольнити визначені певні технологічні та енергетичні вимоги. Структурна схема встановлює взаємозв'язок об'єкта регулювання з елементами системи автоматичного регулювання, що може містити в собі датчики (D_1, D_2, \dots), порівнювальні пристрої (ПЕ), підсилювальні пристрої (ПП), виконавчий пристрій (ВП), коректувальний пристрій (КП) та ін. (рис. 5).

Датчик D_1 задавального пристрою виробляє вхідну величину (сигнал) $X(t)$. Вихідна величина $Y(t)$ надходить на датчик D_2 , де перетворюється у форму, зручну для подальшої обробки (напр., в електричну напругу). Вхідна і вихідна величини надходять на порівнювальні пристрої, (ПЕ), на виході яких утворюється сигнал неузгодженості (помилки) $Z(t)$, що дорівнює різниці між вхідною і вихідною величинами $Z(t) = X(t) - Y(t)$.

У керуючому пристрої сигнал помилки підсилюється, проходить обробку і надходить на виконавчий пристрій ВП, де перетворюється у керуючий вплив, що діє на об'єкт регулювання ОР.

Для забезпечення необхідних якісних показників роботи системи застосовуються коригувальні пристрої КП, що можуть бути ввімкнені послідовно чи паралельно.

Системи автоматичного регулювання (керування) можуть бути розімкнутими чи замкнутими.

Розімкнута система автоматичного регулювання призначена для автоматичного виконання операцій, що задаються зовнішніми джерелами впливів на вході цієї системи, при цьому процес керування не залежить від кінцевого результату.

Керування яким-небудь процесом у замкнутій системі відбувається без участі людини. Роль людини тут зводиться лише до подачі початкового пускового імпульсу, але в більшості випадків такий імпульс подається автоматично.

Приклад. На вхід системи надходить сигнал від датчика D задавального пристрою (рис. 6). Цей сигнал у підсилювальному пристрої ПП перетворюється у фізичну величину, зручну для подальшої обробки. Далі сигнал надходить у виконавчий пристрій, де він перетворюється у керуючий вплив об'єкта регулювання ОР.

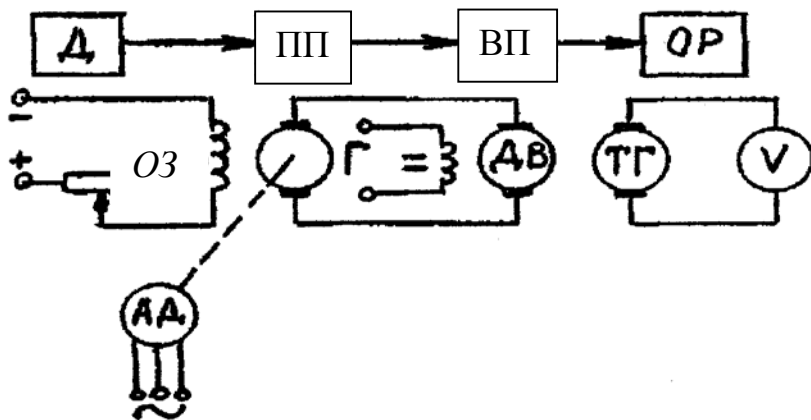


Рисунок 6 – Система регулювання частоти обертання двигуна постійного струму

При переміщенні движка реостата R змінюється струм в обмотці збудження OZ генератора Γ , що приводить до зміни його ЕРС і, отже, напруги на щітках двигуна постійного струму $ДВ$. Ротор генератора Γ починає обертатися асинхронним двигуном змінного струму $АД$.

Тахогенератор $ТГ$ зв'язаний з валом двигуна $ДВ$ і розвиває ЕРС, пропорційну частоті обертання двигуна $ДВ$. До щіток тахогенератора підключений вольтметр, проградуїований у частотах обертання вала двигуна. Відповідно до закону переміщення движка потенціометра, що задається оператором, змінюється частота обертання двигуна постійного струму. Однак під дією збурюючих впливів (зміни навантажувального моменту, магнітних властивостей сталі та ін.) частота обертання не буде строго пропорційною переміщенню движка. Компенсувати це відхилення можна вручну за показаннями вольтметра чи автоматично за допомогою замкнутої системи.

Замкнута система виробляє керуючий вплив шляхом порівняння дійсного значення керованої величини з запропонованим. У цьому випадку система має додатковий зворотний зв'язок об'єкта регулювання з елементом порівняння. У ланцюг зворотного зв'язку встановлений додатковий датчик $Д_2$ (рис. 7).

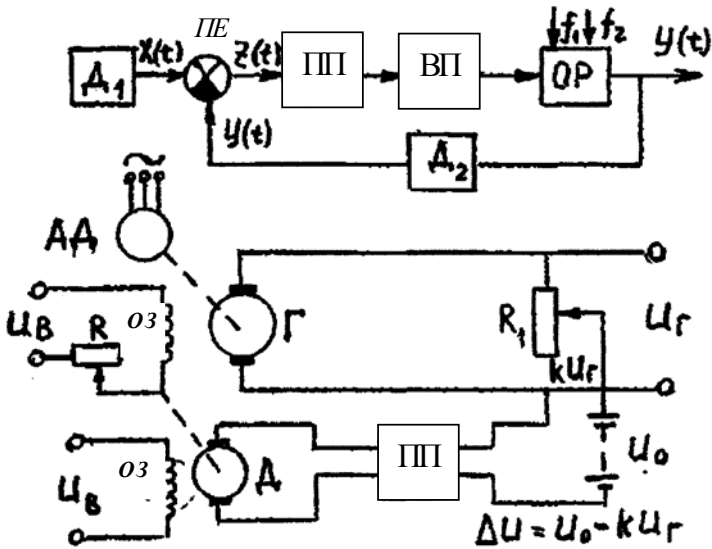


Рисунок 7

Якщо значення керованої величини, що надходить від датчика Δ_1 на вхід системи керування, і значення запропонованого сигналу, що надходить від датчика Δ_2 не однакові, то на виході порівнювального пристрою ПЕ, виникає сигнал їхньої різниці $Z(t)=X(t)-Y(t)$, що впливає на систему таким чином, що надалі ця різниця автоматично зводиться до дуже малого значення (теоретично до нуля).

Прикладом замкнутої системи може бути схема автоматичного регулювання напруги генератора постійного струму.

З потенціометра R_1 знімається напруга kU_G , пропорційна регульованій напрузі U_G , що порівнюється з напругою U_0 еталонної батареї. Різниця $\Delta U=U_0-kU_G$ подається на вхід підсилювача ПП, до виходу якого підключений виконавчий двигун постійного струму Д. Двигун надає руху регулюючому органу - реостату R, який ввімкнений у ланцюг обмотки збудження O_3 генератора. При збільшенні напруги U_G порівняно з заданим значенням двигун перемістить повзунок реостата так, щоб опір реостата збільшився і напруга, підведена до обмотки збудження O_3 генератора, зменшилася. У зв'язку з цим відбудеться зменшення регульованої напруги генератора U_G .

Подібні системи називають системами непрямого регулювання. У малопотужних системах застосовують пряме регулювання, коли

керування виконавчим органом здійснюється безпосередньо сигналом помилки (без посилення).

3 Класифікація САР

Системи автоматики класифікуються за такими ознаками:

- 1 За законом зміни регульованих параметрів:
 - 1.1 Стабілізуючі, коли задане значення регульованого параметра є постійним.
 - 1.2 Програмні, коли регульований параметр змінюється за заздалегідь заданою програмою.
 - 1.3 Слідкуючі, коли значення вихідного керуючого впливу відповідають заздалегідь відомому вхідному керуючому впливу, що змінюється.
- Приклади. Рівень води в котлі, температура в печі та ін; зміна величини подачі шліфувального круга з урахуванням його зносу; гідрокопіювання.
2. За видом рівнянь:
 - 2.1 Лінійні.
 - 2.2 Нелінійні.
- 3 За характером сигналів:
 - 3.1 Безперервні.
 - 3.2 Дискретні.

ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

1 Математичний опис елементів і систем

При замиканні система, що розроблена на попередньому етапі і задовольняє усі вимоги постійного режиму, часто виявляється хиткою. Хиткою система вважається в тому випадку, якщо при знятті вхідного керуючого сигналу на її виході мають місце незгасаючі коливання.

Таким чином, одним із центральних питань, які необхідно вирішити при проектуванні замкнутої системи автоматичного регулювання, є забезпечення їхньої стійкості. Стійкість, швидкодія і коефіцієнт підсилення, що є основними критеріями якості, перебувають між собою в протиріччі, і при дослідженні системи треба приймати компромісне рішення.

Математична модель системи являє собою диференціальне рівняння (чи систему рівнянь), що встановлює кількісні чи логічні залежності між окремими елементами системи, а також між системою та об'єктом керування.

Розв'язання системи диференціальних рівнянь високого порядку являє собою велику складність, а в більшості випадків неможливе. Для полегшення цієї задачі розроблено кілька методів. Одним з найбільш поширених є метод перетворення Лапласа-Карсона. Цей метод базується на тому, що задані і шукані функції часу $U(t)$ заміняють їхніми зображеннями \bar{U} . Ці функції одержують, використовуючи перетворювач Лапласа-Карсона:

$$\bar{U} = p \cdot \int_0^{\infty} U(t) \cdot e^{-pt} dt.$$

Використання перетворювача дозволяє такі трудомісткі операції, як диференціювання, інтегрування функції часу за нульової початкової умови, замінити відповідно множенням і діленням на оператор P . Наприклад, диференціальне рівняння вигляду

$$A_0 \cdot \frac{d^n y}{dt^n} + A_1 \cdot \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} + \dots + A_n y = B_0 \cdot \frac{d^m x}{dt^m} + B_1 \cdot \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + B_m x$$

можна замінити на

$$(A_0 p^n + A_1 p^{n-1} + \dots + A_n) \cdot \bar{y} = (B_0 p^m + B_1 p^{m-1} + \dots + B_m) \cdot \bar{x},$$

де y, x - вихідна і вхідна функції часу; \bar{y} і \bar{x} - їхнє зображення; P - оператор Лапласа.

У зв'язку з тим що викладені перетворення Лапласа дійсні тільки за нульових початкових умов, слід уточнити, що під цим розуміється.

Під нульовими початковими умовами для диференціального рівняння n -го порядку розуміються умови, за якими функція $y(t)$ і всі її похідні, до $(n-1)$ включно, дорівнюють нулю при $t=0$.

Фізично це означає, що такий перехід від оригіналів функцій до їхніх зображень правомірний, якщо до надходження збурюваного чи заданого впливу на об'єкт система перебувала в стані рівноваги. Цей стан і береться за нульовий. При надходженні задавального чи збурюючого впливу відлік значень $y(t)$ здійснюється від устанавленого (нульового) стану, а часу t - з моменту надходження впливу.

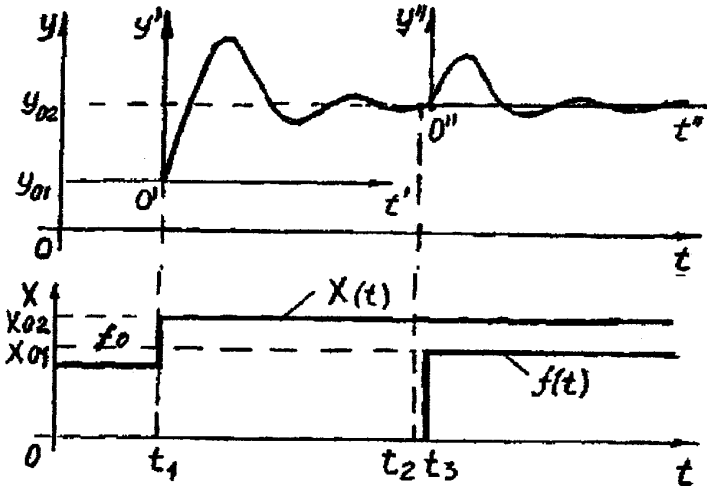


Рисунок 8

Графічно це означає, що при описі САР диференціальним рівнянням процесу регулювання при задавальному впливі, за нульовий стан береться точка O' , а при збурюючому впливі - точка O'' . Відповідно зміна $y(t)$ розглядається у координатах (y', t') і (y'', t'') . Формальне перетворення Лапласа здійснюється заміною символу d/dt у диференціальному рівнянні на оператор P .

2 Передатні функції

Розділивши зображення вихідної величини на зображення вхідної величини, одержують передатну функцію розглянутої системи:

$$W(p) = \frac{\bar{y}}{\bar{x}} = \frac{y(t)}{x(t)} = \frac{B_0 \cdot p^m + B_1 \cdot p^{m-1} + \dots + B_m}{A_0 \cdot p^n + A_1 \cdot p^{n-1} + \dots + A_n}$$

Оскільки передатна функція системи цілком визначає її динамічні властивості, то початкова задача розрахунку САР зводиться до визначення цієї передатної функції.

Для одержання зображення вихідної величини можна записати

$$y(p) = x(p) \cdot W(p).$$

Метод Лапласа-Карсона застосовується для лінійних функцій з постійними коефіцієнтами.

Для спрощення задачі знаходження передатних функцій елементів системи доцільно систему попередньо зобразити у вигляді структурної схеми з елементарними, бажано типовими ланками.

При цьому уявляється доцільним на функціональних структурних схемах при зображенні ланок і з'єднань у вигляді прямокутників вписувати в них позначення їх передатних функцій (рис.9).

Наприклад:

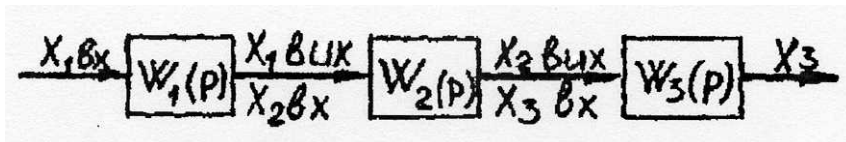


Рисунок 9

Приклад

Скласти диференціальне рівняння і знайти передатну функцію пристрою для вимірювання лінійних прискорень (рис. 9) з урахуванням маси рухливих частин. Вхідна величина - переміщення корпусу x , вихідна - переміщення поршня y .

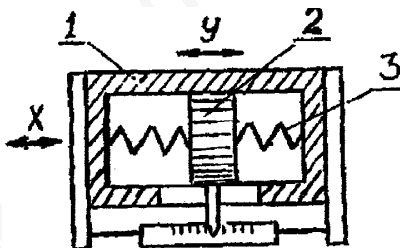


Рисунок 10 - Схема пристрою для вимірювання лінійних прискорень:

1 - корпус; 2 - поршень; 3 - пружина

Розв'язання

1 Складемо рівняння рівноваги сил з огляду на те, що пристрій характеризується наявністю одного ступеня вільності:

$$F_n = F_k - F_c,$$

де F_n - сила, що приводить у рух поршень відносно корпусу; F_k - інерція, що передається поршню від корпусу пристрою; F_c - опір руху поршня.

2 Виразимо сили через конкретні величини:

$$F_n = m_n \frac{d^2 y}{dt^2},$$

де m_n – маса поршня.

$$F_k = m_k \frac{d^2 x}{dt^2},$$

$$F_c = k_1 y + k_2 \cdot \frac{dy}{dt},$$

де k_1 - коефіцієнт пружності пружини; k_2 - коефіцієнт, що враховує тертя; m_k - маса корпусу.

2 Розв'яжемо спільно наведені вище рівняння відносно вхідної і вихідної величин:

$$m_n \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} + k_1 y + k_2 \cdot \frac{dy}{dt} = m_k \cdot \frac{d^2 x}{dt^2}.$$

2 Перетворимо отриманий вираз до більш зручної форми й одержимо диференціальне рівняння

$$T^2 \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot \frac{dy}{dt} + y = K_y \cdot \frac{d^2 x}{dt^2},$$

де $T^2 = \frac{m_n}{K_1}$, $\xi = \frac{K_2}{(2\sqrt{m_n \cdot K_1})}$, $K_y = \frac{m_k}{K_1}$ - коефіцієнти підсилення.

2 На основі диференціального рівняння запишемо передатну функцію

$$W(p) = \frac{y}{x} = \frac{K_y p^2}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}.$$

Системи автоматичного регулювання можуть бути зображені у вигляді комбінацій ланок:

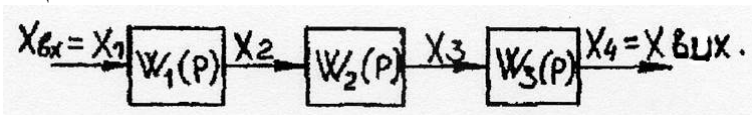


Рисунок 11

При послідовному з'єднанні ланок вихідна величина попередньої ланки надходить на вхід наступної. Диференціальні рівняння окремих ланок мають вигляд

$$X_2=W_1(p) \cdot X_1, \quad X_3=W_2(p) \cdot X_2, \quad X_4=W_3(p) \cdot X_3.$$

Вилучивши всі проміжні змінні, одержимо:

$$X_4=W_3(p) \cdot W_2(p) \cdot W_1(p) \cdot X_1,$$

чи

$$X_{\text{вих}}=W_e(p) \cdot X_{\text{вх}},$$

де $W_e(p)=W_3(p) \cdot W_2(p) \cdot W_1(p)$ - передатна функція еквівалентної ланки. У загальному вигляді

$$W_e(p) = \prod_{k=1}^n W_k(p).$$

Тобто передатна функція послідовного з'єднання ланок дорівнює добутку передатних функцій окремих ланок.

При паралельному з'єднанні ланок загальна передатна функція дорівнює алгебраїчній сумі передатних функцій окремих ланок:

$$W_e(p) = \sum_{k=1}^n W_k(p).$$

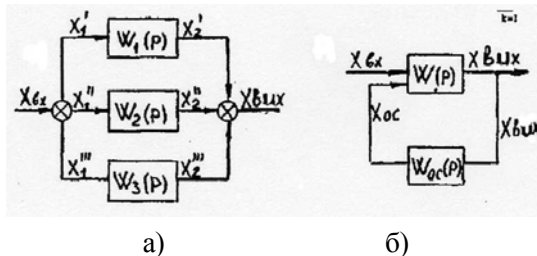


Рисунок 12 – З'єднання ланок:
 а) паралельне; б) зустрічно-паралельне

При з'єднанні ланок зі зворотним зв'язком напрямок передачі сигналів не збігається. При цьому вихідна величина основної ланки з його виходу подається через ланку в ланцюзі зворотного зв'язку $W(p)$ знову на вхід основної ланки. Якщо до введення зворотного зв'язку рівняння основної ланки мало вигляд $X_{\text{вих}}=W(p) \cdot X_{\text{вх}}$, то після

введення зворотного зв'язку співвідношення між вхідною і вихідною величинами еквівалентної ланки визначається виразом

$$X_{\text{вих}} = W_e(p) \cdot (X_{\text{вх}} \pm X_{3.3}), \text{ де } X_{3.3} = W_{3.3}(p) \cdot X_{\text{вих}}.$$

Знак плюс відповідає позитивному зворотному зв'язку, а мінус - негативному. Виключаючи проміжну величину $X_{3.3}$ і згрупувавши співмножники з $X_{\text{вих}}$, одержимо

$$[1 \pm W_{3.3}(p) \cdot W(p)] \cdot X_{\text{вих}} = W(p) \cdot X_{\text{вх}},$$

звідки передатна функція еквівалентної ланки буде

$$W_e(p) = \frac{W(p)}{1 \pm W_{3.3}(p) \cdot W(p)}.$$

Тут знак плюс відповідає негативному зворотному зв'язку, а мінус - позитивному.

Розглянемо приклади впливу зворотного зв'язку на характеристики основної ланки.

Якщо ланка $W(p) = \frac{K}{Tp + 1}$ охоплена зворотним зв'язком $W_{3.3} = K_{3.3}$, то

згідно з рівнянням для позитивного зворотного зв'язку одержуємо

$$W_e(p) = \frac{\frac{K}{Tp + 1}}{1 - \left(\frac{K \cdot K_{3.3}}{Tp + 1}\right)}.$$

Еквівалентна ланка зберегла первісну структуру передатної функції і його динамічні властивості. Змінилися лише величини коефіцієнта передачі і сталої часу.

Розроблені інженерні методи визначення оптимальних параметрів настроювання регуляторів, розраховані на стандартний вигляд структурної схеми САР. У зв'язку з цим, визначивши вихідну структурну схему САР у вигляді з'єднаних певним чином її елементарних ланок і знайшовши їхні передатні функції, необхідно послідовно спрощувати структуру за правилами еквівалентного перетворення.

3 Основні правила перетворення структурних схем

3.1 Ланки, з'єднані послідовно, можна замінити однією ланкою з передатною функцією, яка дорівнює добутку передатних функцій послідовно з'єднаних ланок.

3.2 Ланки, з'єднані паралельно, можна замінити однією ланкою з передатною функцією, що дорівнює сумі передатних функцій паралельно з'єднаних ланок.

3.3 Ланки, з'єднані зустрічно-паралельно, можна з'єднати в одну ланку з передатною функцією:

$$W_e(p) = \frac{W(p)}{1 \pm W_{3.3} \cdot W(p)}$$

3.1 Зовнішній вплив f , прикладений до виходу ланки з передатною функцією $W_1(p)$, можна перенести на його вхід, помістивши між впливом входу ланки додатково ланку з передатною функцією $\frac{1}{W_1(p)}$ (рис. 13).

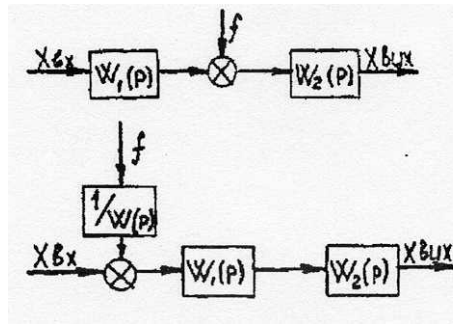


Рисунок 13

3.1 Зовнішній вплив f , прикладений до входу ланки з передатною функцією $W(p)$, можна перенести на його вихід, помістивши між впливом f і виходом ланки, додатково ланку з тією самою передатною функцією (рис. 14).

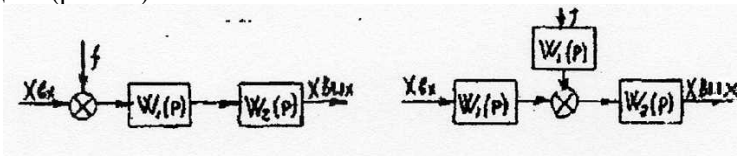


Рисунок 14

3.1 Точку приєднання будь-якого структурного зв'язку, що відходить від виходу ланки, що має передатну функцію $W_1(p)$, можна перенести на його вхід, включивши в цей зв'язок додаткову ланку з тією самою передатною функцією $W_1(p)$ (рис. 15).

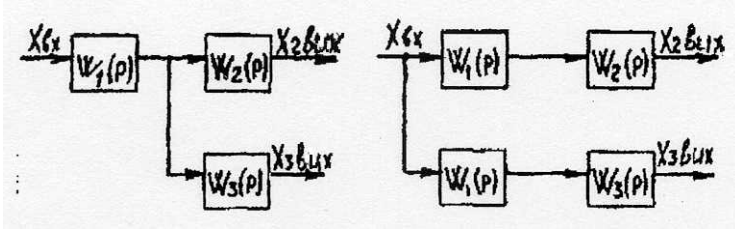


Рисунок 15

3.1 Точку приєднання будь-якого структурного зв'язку, що відходить від входу ланки з передатною функцією $W_1(p)$, можна перенести на його вихід, включивши в цей зв'язок додаткову ланку з передатною функцією

$$\frac{1}{W_1(p)} \text{ (рис. 16).}$$

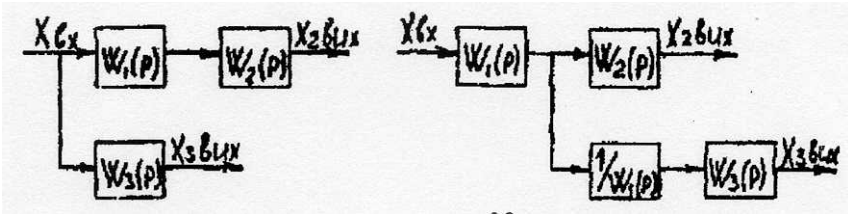


Рисунок 16

За допомогою перелічених правил структурні схеми з перехресними зв'язками можна перетворювати в структурні схеми без перехресних зв'язків, багатоконтурні автоматизовані системи регулювання зображувати еквівалентними одноконтурними, а також виділяти лінійну частину в нелінійних САР.

Приклад

Електромеханічна система автоматичного регулювання подачі шліфувального круга залежно від зношення круга і розмірів оброблюваних деталей може бути записана системою диференціальних рівнянь окремих ланок.

$$1. \quad 0,4 \cdot \frac{dx_1}{dt} + x_1 = 2(x - y).$$

$$2. \quad \frac{dx_2}{dt} = 8(x_1 - x_2).$$

$$3. \quad x_3 = 3x_2.$$

$$4. \quad \frac{dy}{dt} = 0,3x_3.$$

Скласти структурну схему цієї системи, перетворити її, визначити вираз передатної функції.

Розв'язання

1 Запишемо рівняння ланок в операторній формі (див. рис. 17, 18, 19):

Ланка 1

$$0,4px_1 + x_1 = 2(x - y);$$

$$x_1(0,4p + 1) = 2(x - y);$$

$$W_1(p) = \frac{x_1}{x - y} = \frac{2}{0,4p + 1}.$$

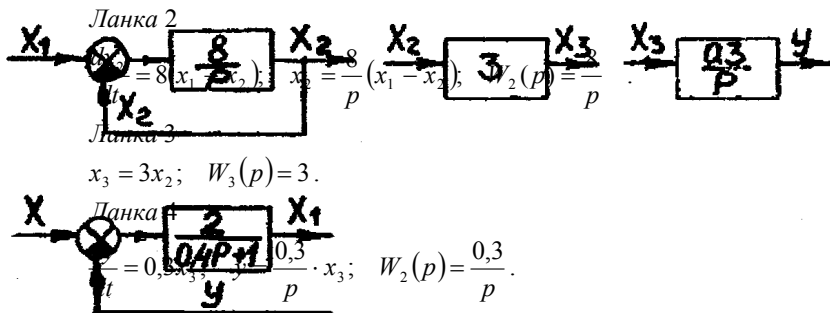


Рисунок 17

2 На основі структурних схем ланок побудуємо структурну схему САР.

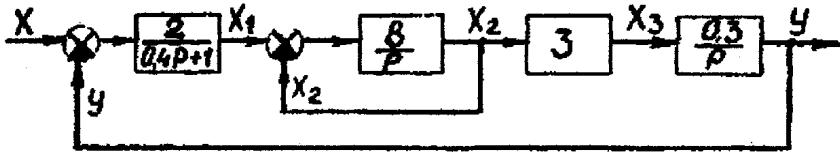
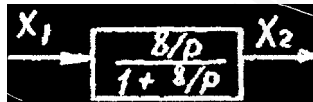


Рисунок 18

3. Перетворимо структурну схему ланки 2 з урахуванням одиничного зворотного зв'язку:

$$W_2(p) = \frac{W_2(p)}{1 \pm W_2(p)} = \frac{\frac{8}{p}}{1 + \frac{8}{p}}$$



4. Побудуємо структурну схему САР з урахуванням перетворення ланки 2:

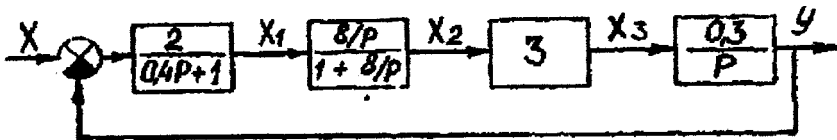


Рисунок 19

$$W(p) = \frac{\frac{2}{(0,4 \cdot P + 1)} \cdot \frac{8/P}{1 + 8/P} \cdot 3 \cdot \frac{0,3}{P}}{1 + \frac{2}{(0,4 \cdot P + 1)} \cdot \frac{8/P}{1 + 8/P} \cdot 3 \cdot \frac{0,3}{P}}$$

Спростимо вираз передатної функції:

$$W(p) = \frac{14,4 \cdot P \cdot (0,4 \cdot P + 1) \cdot (P + 8)}{P \cdot (0,4 \cdot P + 1) \cdot (P + 8) + 14,4}$$

ХАРАКТЕРИСТИКИ

1 Статичні характеристики

Характеристика - це залежність однієї величини від іншої. Розрізняють характеристики статичні і динамічні.

Статичні характеристики оцінюють роботу елементів в усталеному режимі. Під статичною характеристикою розуміється залежність вихідної величини елемента від вхідної в усталеному режимі

$$y = f(x),$$

де y - вихідна величина; x - вхідна.

Статичні характеристики можуть бути лінійними чи нелінійними. Статична характеристика датчиків іноді називається тарувальною, вона необхідна при вимірюванні вихідних величин і задається у вигляді таблиць чи графіків.

Лінійна статична характеристика має вигляд прямої, яка проходить через початок координат під кутом $\alpha = \arctg K$, де K - коефіцієнт передачі.

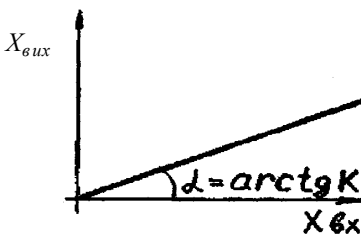


Рисунок 20

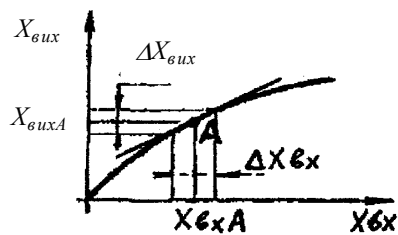


Рисунок 21

Реальні статичні характеристики нелінійні. Але якщо ступінь нелінійності невеликий, то для невеликого діапазону змін вхідної величини деяку ділянку кривої можна замінити або дотичною, або

січною. Ця операція називається лінеаризацією статичної характеристики

$$K = \frac{dx_{вих}}{dx_{вх}}$$

Стосовно до датчиків передатний коефіцієнт називають чутливістю.

Мінімальне значення вхідної величини, що може викликати зміна вихідної величини, називається порогом чутливості. Відрізок між початком координат і порогом чутливості називається зоною нечутливості.

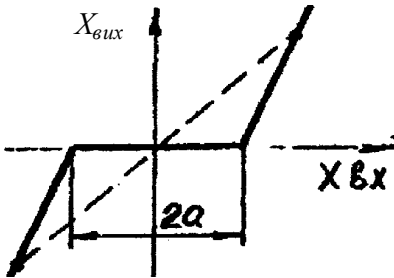


Рисунок 22 - Зона нечутливості

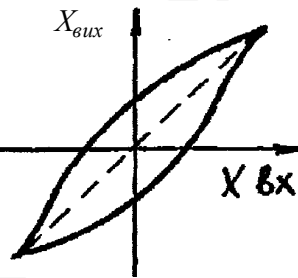


Рисунок 23 - Гістерезисна нечутливість

Існують такі види статичних характеристик:

- безперервні нереверсивні (рис. 24);
- релейні нереверсивні (рис. 25);
- безперервні реверсивні (рис. 26);
- релейні реверсивні двопозиційні (рис. 27);
- релейні реверсивні трипозиційні (рис. 28).

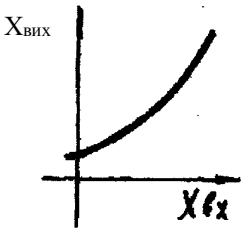


Рисунок 24

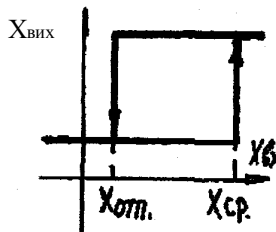


Рисунок 25

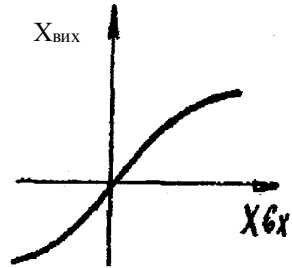


Рисунок 26

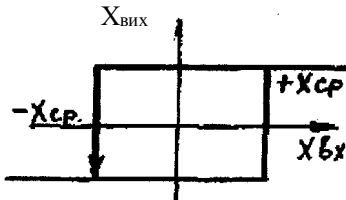


Рисунок 27

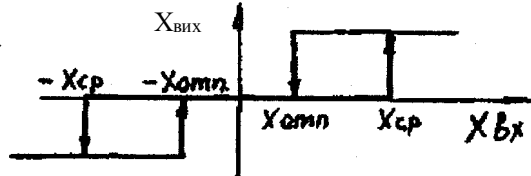


Рисунок 28

2 Динамічні характеристики

У реальних системах автоматики сигнали, як правило, бувають непостійними. У більшості випадків вони змінюються у часі. Для систем у цілому чи для їх окремих частин і елементів основним режимом роботи є режим, при якому вхідні і вихідні величини не залишаються постійними. Такий режим називається динамічним.

Для оцінки роботи елементів у динамічному режимі використовують динамічні характеристики (частотну і перехідну) і динамічні параметри, напр. постійну часу T .

Динамічна характеристика - це залежність вихідної величини сигналу y від часу t :

$$y = f(t).$$

Характер зміни вихідної величини елемента залежить від властивостей самого елемента і від характеру зміни його вхідної величини. Тому для порівняння динамічних властивостей різних елементів треба подавати на входи однакові сигнали, що змінюються в часі.

Реакція більшості елементів на стрибкоподібну зміну вхідного сигналу, тобто їхня перехідна характеристика, являє собою наростаючу експоненту (рис. 29).

Час від початку експонентної зміни вихідної величини до моменту, коли вона досягне 63% усталеного значення вихідної величини, називається сталою часу T . Чим менша T , тим крутіша характеристика, менша тривалість перехідного процесу, менша інерційність елемента.

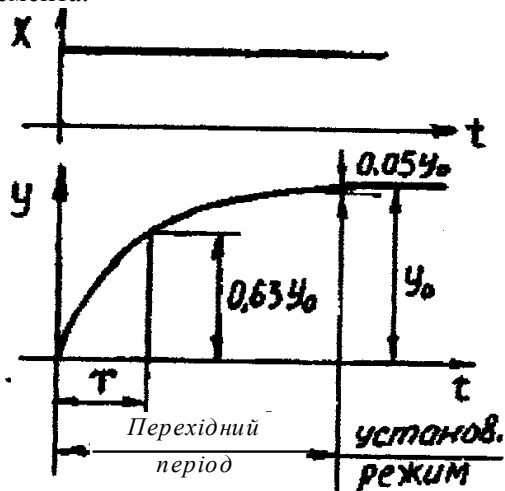


Рисунок 29

До подачі стрибкоподібного сигналу на вхід елемент перебуває в одному усталеному режимі, після подачі - в іншому. Таким чином, перехідна характеристика дозволяє виявити й оцінити інерційність елемента, тобто запізнювання в зміні вихідного сигналу порівняно зі зміною сигналу на вході елемента.

Крива $y=f(t)$ є графічною інтерпретацією розв'язання диференціального рівняння, яким описується поведінка елемента при перехідному процесі, де вхідні і вихідні сигнали є функціями часу.

Різні елементи автоматики мають різні графіки перехідних процесів, наприклад:

- перехідний процес без запізнювання (рис. 30);
- перехідний процес з інерцією (аперіодичний) (рис. 31);
- коливально-загасаючий перехідний процес (рис. 32).

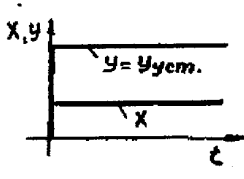


Рисунок 30

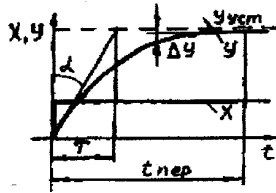


Рисунок 31

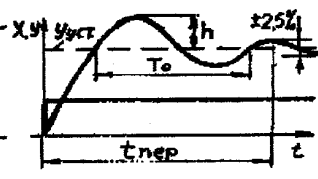


Рисунок 32

При коливально-загасаючому перехідному процесі вихідна величина сигналу коливається у межах її усталеного значення $y_{уст}$ із частотою $f_0 = \frac{1}{T}$; T_0 - період коливань з безперервно-спадною амплітудою, $t_{пер}$ - тривалість перехідного процесу.

Момент часу, коли вихідна величина відрізняється від усталеного значення на 5%, вважається моментом закінчення перехідного процесу. При цьому тривалість аперіодичного перехідного процесу дорівнює приблизно $3T$ ($t_n = 3T$).

Вхідний сигнал може змінюватися періодично, при цьому вихідний сигнал y має аналогічний характер, але зсунутий за фазою на кут φ . У будь-який момент часу криві Y і X мають різницю ординат. Ця різниця називається абсолютною динамічною похибкою.

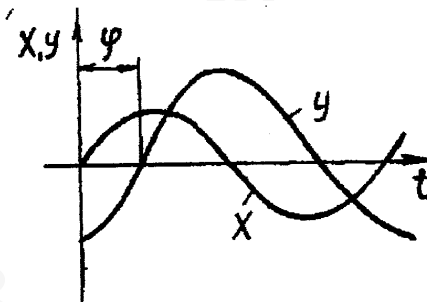


Рисунок 33 – Періодичний перехідний процес

ТИПОВІ ДИНАМІЧНІ ЛАНКИ

1 Поняття про динамічну ланку

Будь-який автоматичний пристрій можна подати у вигляді сукупності найпростіших складових частин - ланок, кожна з яких має динамічні властивості.

Під елементарною динамічною ланкою розуміється штучно виділена частина автоматичної системи, що відповідає якому-небудь елементарному математичному чи графічному опису динамічного процесу.

Однією елементарною ланкою можуть бути зображені кілька елементів системи чи, навпаки, один елемент може бути зображений у ряді декількох ланок.

Схеми ланок і принцип їхньої дії можуть бути різними, однак їх можна звести до декількох, так званих типових ланок, якщо в основу класифікації покласти залежність вхідних і вихідних сигналів ланки від часу. При цьому за типовий вхідний сигнал береться стрибкоподібна функція.

2 Види ланок

Залежно від характеру проходження перехідного процесу розрізняють такі типові ланки САР:

- безінерційні;
- аперіодичні;
- диференціюючі;
- інтегруючі;
- коливальні.

Безінерційною називають ланку, у якій вихідний сигнал y пропорційний вхідному x :

$$y = k \cdot x .$$

Ця ланка називається також ідеальною, підсилувальною, пропорційною чи без'ємнісною.

Приклади: подільник напруги, електронний підсилювач, редуктор, важіль, трансформатор та ін.

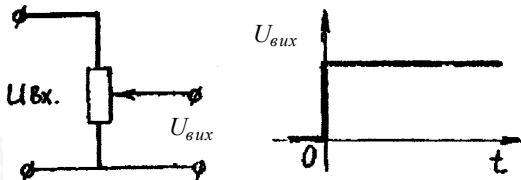


Рисунок 34

Аперіодичною називається ланка, в якій при стрибкоподібній зміні вхідного сигналу його вихідний сигнал запізнюється відносно вхідного і змінюється за експонентним законом зі сталою часу T . Ця ланка називається також інерційною, статичною, одноємнісною, релаксаційною.

Схема і тимчасова характеристика аперіодичної ланки наведені на рисунку 35.

$$U_{\text{вх}} = U_R + U_{\text{вих}} = i \cdot R + U_{\text{вих}}, \quad i = c \frac{du_{\text{вих}}}{dt},$$

$$U_{\text{вх}} = R \cdot c \frac{du_{\text{вих}}}{dt} + U_{\text{вих}}.$$

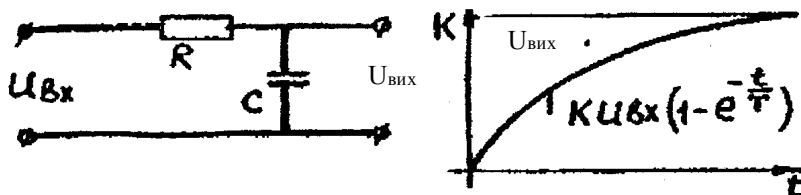


Рисунок 35

Символ d/dt можна позначити оператором p , $R \cdot c$ - стала часу, що характеризує інерційність ланки.

Тоді в операторній формі запису диференціальне рівняння буде мати такий вигляд:

$$U_{\text{вх}} = (Tp + 1)U_{\text{вих}},$$

$$W(p) = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{1}{Tp + 1}.$$

Розв'язання цього диференціального рівняння дає рівняння динамічної характеристики аперіодичної ланки

$$U_{\text{вих}} = R \cdot U_{\text{вх}} (1 - e^{-\frac{t}{T}}).$$

Диференціюючою називають ланку, у якій вихідний сигнал змінюється пропорційно швидкості зміни вхідного сигналу. Така ланка називається імпульсною ланкою першого порядку.

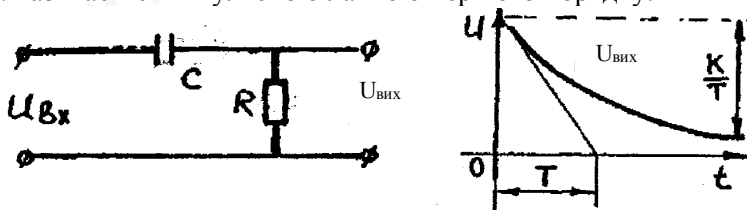


Рисунок 36

Згідно з законом Ома для електричного ланцюга, що містить ємність і активний опір, справедлива рівність

$$i_1 R = i_2 R + U_{вих}.$$

Диференціальне рівняння має вигляд

$$c \cdot R \frac{dU_{ex}}{dt} = c \cdot R \frac{dU_{вих}}{dt} + U_{вих},$$

$$T \frac{dU_{ex}}{dt} = T \frac{dU_{вих}}{dt} + U_{вих},$$

де $T=R \cdot c$.

В операторній формі запису

$$TpU_{ex} = (Tp + 1)U_{вих}.$$

Передатна функція диференціюючої ланки

$$W(p) = \frac{U_{вих}}{U_{ex}} = \frac{Tp}{Tp + 1}.$$

У загальному вигляді $W(p) = \frac{Kp}{Tp + 1}$.

Безінерційна диференціююча ланка має передатну функцію

$$W(p) = kp.$$

Інтегруючою ланкою можна вважати електродвигун (вихід - кут повороту), конденсатор.

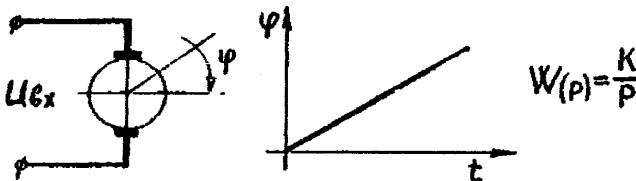


Рисунок 37

Напряга на вході двигуна зрівноважується електрорушійною силою і спаданням напруги в якорі:

$$U = R_{я} \cdot \Phi_B \cdot n - i_{я} \cdot R_{я},$$

де $R_{я}$ - стала двигуна; Φ_B - магнітний потік збудження двигуна; n - частота обертання вала двигуна; $i_{я}$, $R_{я}$ - струм і опір якоря.

При незначному навантаженні величинами $i_{я}$, $R_{я}$ можна знехтувати. Φ_B - величина постійна, тому можна записати

$$n = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{U_{ex}}{k},$$

де $\varphi = \frac{1}{k} \cdot \int_0^t U_{ex} \cdot dt$ - диференціальне рівняння. В оперативній формі запис має вигляд

$$\varphi \cdot p = \frac{U_{ex}}{k},$$

$$W(p) = \frac{\varphi}{U_{ex}} = \frac{k}{p}.$$

Колівальною називається ланка, у якій при стрибкоподібній зміні вхідного сигналу вихідний сигнал прагне до свого нового усталеного значення, роблячи загасаючі коливання.

Наприклад: електричні контури, що складаються з активного опору (резистора) котушки індуктивності і конденсатора; механічні колівальні пристрої, які мають масу, пружність і в'язке тертя (демпфірування).

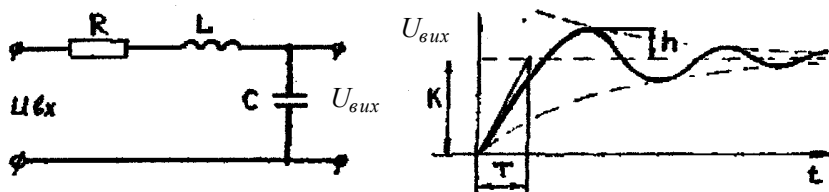


Рисунок 38

Диференціальне рівняння ланки в операторній формі запису має вигляд

$$(T^2 p^2 + 2\xi \cdot Tp + 1)U_{вих} = kU_{ex}.$$

Передатна функція

$$W(p) = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1},$$

де $\xi = \frac{R \cdot c}{2T}$ – коефіцієнт затування ;

$T = \sqrt{L \cdot c}$ – стала часу .

ЗАСТОСУВАННЯ ЧАСТОТНИХ ПЕРЕДАТНИХ ФУНКЦІЙ І ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПІД ЧАС АНАЛІЗУ СТІЙКОСТІ САР

1 Частотні характеристики

Тимчасові характеристики описують поведінку системи при одиничному незмінному сигналі. Однак у реальних умовах регулюючий вплив і зовнішній вплив не є постійними, і тимчасові характеристики не можуть цілком визначити поведінку системи. Під час аналізу системи на стійкість застосовують частотні методи, які досліджують поведінку систем при подачі на вхід синусоїдального сигналу з амплітудою $A_{\text{вх}}$.

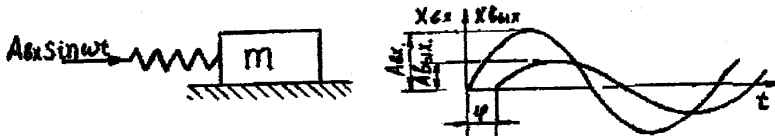


Рисунок 39

Розглянемо приклад. На вільний кінець пружини діє періодично сила, яка змінюється, в результаті чого він переміщується за залежністю $x_{\text{вх}} = A_{\text{вх}} \sin \omega t$, де $A_{\text{вх}}$ - амплітуда синусоїдального сигналу, ω - частота. У результаті впливу маси і тертя вантаж буде переміщатися з тією самою частотою, але з меншою амплітудою $A_{\text{вих}}$ і з запізнюванням за фазою на кут φ , тобто $X_{\text{вих}} = A_{\text{вих}} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$.

Очевидно, зі зміною частоти змінюються значення амплітуди на виході $A_{\text{вих}}$ і фази φ .

Співвідношення між вхідними і вихідними коливаннями описуються частотними характеристиками:

- амплітудно-частотними - (АЧХ), $A(\omega)$;
- фазочастотними - $\varphi(\omega)$, (ФЧХ);
- амплітудно-фазовими - $W(j\omega)$, (АФХ, АФЧХ).

Амплітудно-частотна характеристика встановлює залежність відношення амплітуди коливання на виході ланки до амплітуди коливання на вході від частоти гармонійних коливань, поданих на вхід:

$$A(\omega) = \frac{A_{\text{вих}}(\omega)}{A_{\text{вх}}(\omega)} .$$

Фазова (чи фазочастотна) характеристика являє собою залежність зсуву фази коливань на виході відносно вхідних коливань:

$$\varphi(\omega) = \varphi_{\text{вих}}(\omega) - \varphi_{\text{вх}}(\omega) .$$

Амплітудно-фазова характеристика (АФХ) поєднує обидві попередні та аналітично зображується у комплексному вигляді, причому модуль характеризує співвідношення амплітуд, а аргумент - зсув фаз при різній частоті:

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

Співвідношення між вхідними і вихідними коливаннями записуються за допомогою передатних функцій $W(\omega)$, під якими

розуміють відношення вектора вихідного коливання до вектора вхідного:

$$X_{\text{вх}} = A_{\text{вх}} \cdot \sin(\omega t) .$$

Після закінчення перехідного процесу на виході установлюються вимушені коливання (при лінійній системі):

$$X_{\text{вих}} = A_{\text{вих}} \cdot \sin(\omega t + \varphi) .$$

Ці рівняння можна записати в символічному вигляді, прийнятому в електротехніці:

$$X_{\text{вх}} = A_{\text{вх}} \cdot e^{j\omega t} , \quad X_{\text{вих}} = A_{\text{вих}} \cdot e^{j(\omega t + \varphi)} ,$$

де $A_{\text{вх}}$, $A_{\text{вих}}$ - амплітуди вхідних і вихідних коливань; $j = \sqrt{-1}$; ω - кутова частота; φ - фазовий зсув.

Амплітудно-фазову характеристику можна зобразити у вигляді комплексної величини $W(\omega) = \frac{x_{вих}}{x_{вх}} = \frac{A_{вих} \cdot e^{j(\omega t + \varphi)}}{A_{вх} \cdot e^{j\omega t}} = Ae^{j\varphi}$,

де $A = |W| = \frac{A_{вих}}{A_{вх}}$ - модуль; φ - аргумент.

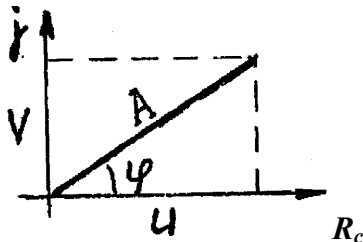


Рисунок 40

$W(\omega)$ можна подати у вигляді відрізка A , нахиленого до осі абсцис під кутом φ . Проекції цього відрізка на дійсну і уявну осі дорівнюють

$$V = A \cdot \sin \varphi, \quad U = A \cdot \cos \varphi.$$

За формулою Ейлера

$$e^{j\varphi} = \cos \varphi + j \sin \varphi$$

комплексну характеристику можна виразити як суму дійсної і уявної частин:

$$W(\omega) = A(\cos \varphi + j \sin \varphi) = U + jV.$$

Тоді амплітудна характеристика може бути отримана з виразу $A = \sqrt{U^2 + V^2}$; фазова характеристика - $\operatorname{tg} \varphi \frac{V}{U}$, $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{V}{U}$.

Графічно амплітудно-фазова характеристика (АФХ) зображує годограф, що будується в комплексній площині при зміні частоти ω від нуля до ∞ (рис. 41).

Частотні передатні характеристики окремих ланок визначаються з передатних функцій заміною оператора p на $j\omega$.

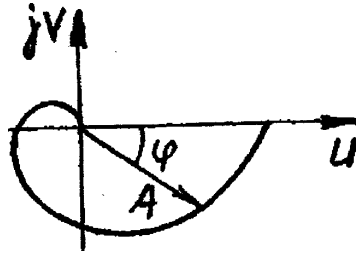


Рисунок 41

Розглянемо для прикладу частотну характеристику аперіодичної ланки, передатна функція якої $W(p) = \frac{K}{Tp + 1}$.

Замінивши p на $j\omega$, одержимо

$$W(j\omega) = \frac{K}{Tj\omega + 1}$$

У результаті множення чисельника і знаменника на сполучене число $1 - j\omega T$ знаменник стає дійсним, а передатна функція в частотній формі запису буде мати вигляд

$$W(j\omega) = \frac{K}{T^2\omega^2 + 1} - j \frac{K\omega T}{T^2\omega^2 + 1}, \text{ тобто}$$

$$U = \frac{K}{T^2\omega^2 + 1}; \quad V = \frac{-K\omega T}{T^2\omega^2 + 1}; \quad \text{tg} \varphi = \frac{V}{U} = -\omega T.$$

Оскільки тангенс від'ємний при всіх значеннях ω , то годограф розміщується у правому нижньому квадранті (рис. 42).

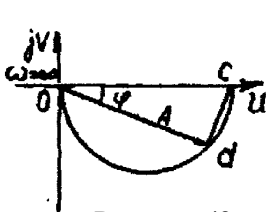


Рисунок 42

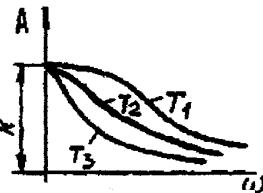


Рисунок 43

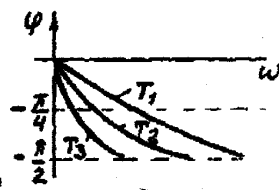


Рисунок 44

При $\omega = 0$, $\text{tg} \varphi = 0$, $\varphi = 0$.

При $\omega = \infty$, $\text{tg} \varphi = -\infty$, $\varphi = -90$.

Модуль передатної функції

$$|W(j\omega)| = A(\omega) = \sqrt{U^2 + V^2} = \frac{K}{\sqrt{1 + T^2 \omega^2}} = \frac{K}{\sqrt{1 + tg^2 \varphi}} = K \cos \varphi.$$

Отже, при $\omega = 0$; $A = K$; при $\omega \rightarrow \infty$; $A = 0$.

З рисунка 42 бачимо, що відрізок Od (модуль A) передатної функції може бути зображений як проекція постійної величини K (відрізок Oc) на лінію, яка проходить під кутом φ до осі дійсних чисел $A = K \cos \varphi$. Це означає, що при всіх значеннях частоти точка d міститься на півколі, яке є годографом передатної функції.

Амплітудно-частотна характеристика, зображена на рисунку 43, для аперіодичної ланки має вигляд

$$A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{1 + T^2 \omega^2}}, \quad T_1 > T_2 > T_3.$$

Зі збільшенням частоти посилення за амплітудою зменшується. При малих частотах ($\omega = 0$) аперіодична ланка повторює на виході вхідну величину з коефіцієнтом K. При $\omega \rightarrow \infty$ ланка не пропускає вхідну величину. Чим більша стала часу T, тим більш різко відбувається заглушення високочастотних коливань.

Фазочастотна характеристика для аперіодичної ланки визначається виразом $\varphi = \arctg(-\omega T)$. Змушені коливання запізнюються за фазою від вхідних гармонійних коливань. Запізнювання збільшується із зростанням частоти ω і сталої часу T (рис. 44).

2 Поняття про стійкість САР

Автоматичні регулятори і слідкуючі системи призначені для підтримки заданого значення регульованої величини. Однак різного роду збурюючі фактори викликають появу помилок у САР.

Поведінка системи у перехідному режимі характеризує її стійкість. Система стійка, якщо виведена зі стану рівноваги, а потім надана сама собі, знову повертається в колишній чи новий стан рівноваги.

При незадовільному сполученні параметрів окремих частин системи регулювання під час перехідного режиму можуть мати місце незгасаючі коливання. Така система нестійка.

Для того щоб визначити стійкість системи, необхідно визначити її поведінку при малих відхиленнях. Якщо система прагне повернутися до зрівноваженого стану, то вона стійка. Якщо в системі виникають сили, що прагнуть збільшити відхилення від зрівноваженого стану, система нестійка.

Як приклад розглянемо переміщення кулі по поверхнях різного профілю під дією короткочасних зовнішніх впливів.

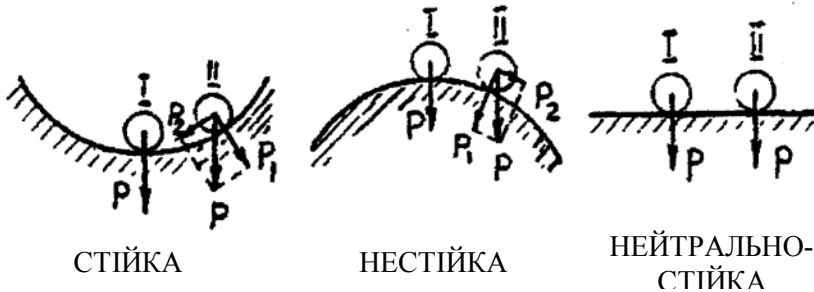


Рисунок 45

Системи, у яких одній і тій самій вхідній величині відповідає нескінченна безліч значень вихідної величини, називають нейтрально - стійкими.

3 Методи розрахунку стійкості

Теорія розрахунку стійкості САР заснована російським вченим А.М. Ляпуновим. У наш час використовують три методи:

- графоаналітичний Михайлова і Найквіста;
- аналітичний Рауса-Гурвіца;
- графоаналітичний, що використовує логарифмічно-частотну характеристику (ЛЧХ).

Метод Рауса-Гурвіца полягає в аналізі коефіцієнтів характеристичного однорідного диференціального рівняння системи, що повинні задовольняти визначені умови. Якщо ці коефіцієнти задовольняють задані вимоги, то система стійка, якщо хоча б одна з умов не задовольняється, то система не стійка. Недоліки:

- для розрахунку необхідно знати диференціальні рівняння всіх вхідних у систему ланок, що не завжди можливо;
- за коефіцієнтами загального диференціального рівняння практично неможливо визначити ланку, що визначає нестійкість системи в цілому.

В основу двох інших методів покладено аналіз амплітудно-фазових характеристик. Метод визначення стійкості за допомогою амплітудно-фазових характеристик полягає в оцінці вигляду годографа передатної функції $W(j\omega)$ розімкнутої системи. Тобто під

час аналізу системи досліджується не диференціальне рівняння, а передатна функція розімкнутої системи.

За критерієм Найквіста система вважається стійкою, якщо годограф не охоплює точку з координатами $[-1; j 0]$.

Якщо характеристика охоплює дану точку, то в замкнутому стані така система нестійка. Приклади стійких систем наведені на рисунках 46а. і 46в. На рисунку 46б наведений графік нестійкої системи.

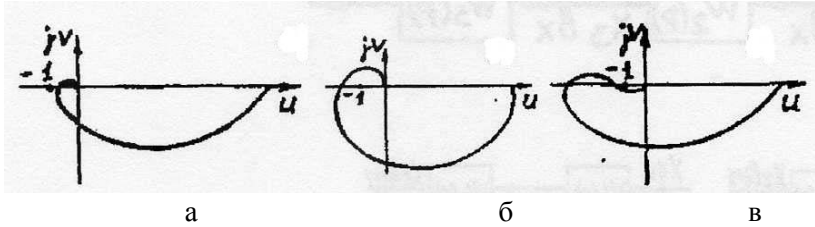


Рисунок 46

Для забезпечення стійкості систем автоматичного регулювання вводять стабілізуючі ланки, які встановлюються послідовно чи паралельно з додатковими зворотними зв'язками. Під додатковим зворотним зв'язком розуміють таке з'єднання, що передає сигнал з виходу якої-небудь ланки системи на вхід одного з попередніх.

4 Застосування логарифмічних частотних характеристик під час аналізу стійкості

У практичних розрахунках під час аналізу стійкості широко використовуються частотні характеристики, побудовані в логарифмічному масштабі у вигляді ламаних ліній із прямолінійних відрізків.

Логарифмуючи АФХ, одержимо

$$\lg(j\omega) = \lg(\omega) + j\varphi\lg e.$$

Логарифмічною одиницею посилення сигналу при проходженні його через який-небудь пристрій при вираженні десятковим логарифмом відношення потужності на виході $P_{\text{вих}}$ до потужності на вході $P_{\text{вх}}$ у техніці прийнятий 1 Бел (на ім'я американського винахідника). Оскільки потужність пропорційна квадрату амплітуди, то можна записати

$$\lg \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}} = \lg \left(\frac{A_{\text{вих}}}{A_{\text{вх}}} \right)^2 = 2 \lg \left(\frac{A_{\text{вих}}}{A_{\text{вх}}} \right).$$

1 Бел - досить велика одиниця (збільшує P в 10 разів), і в теорії автоматичного регулювання за одиницю її взято 1 ДБ=0,1 Б. З урахуванням цього маємо

$$10 \cdot 21\text{г} = \frac{A_{\text{вих}}}{A_{\text{вх}}} = 20\text{г} A(\omega) = L(\omega) \cdot$$

Величину логарифма АЧХ, виражену у децибелах, називають логарифмічною амплітудно-частотною характеристикою (ЛАЧХ).

$$L(\omega) = 20\text{г} A(\omega) \cdot$$

Фазочастотну характеристику $\varphi(\omega)$, побудовану у напівлогарифмічному масштабі ($\varphi^\circ, \text{г}\omega$), називають логарифмічною фазочастотною характеристикою (ЛФЧХ):

За одиницю частоти взята логарифмічна одиниця - октава чи дещо більша - декада. Октавою називають діапазон частот між якою-небудь величиною частоти і її подвоєним значенням.

У логарифмічному масштабі частот відрізок в одну октаву має ту саму довжину, що не залежить від величини ω і дорівнює

$$\text{г}2\omega - \text{г}\omega = \text{г}2 + \text{г}\omega - \text{г}\omega = \text{г}2 \cdot$$

Декадою називають інтервал частот між якою-небудь величиною частоти і її десятикратним значенням. У логарифмічному масштабі частот відрізок в одну декаду також не залежить від частоти і має одну довжину, яка дорівнює $\text{г}10 = 1$.

Необхідною і достатньою умовою стійкості є перетинання ЛАЧХ осі абсцис раніше, ніж ЛФЧХ перетне лінію, яка відповідає її фазовому зсуву, що дорівнює $-\pi$, ω_c - частота зрізу (рис. 47).

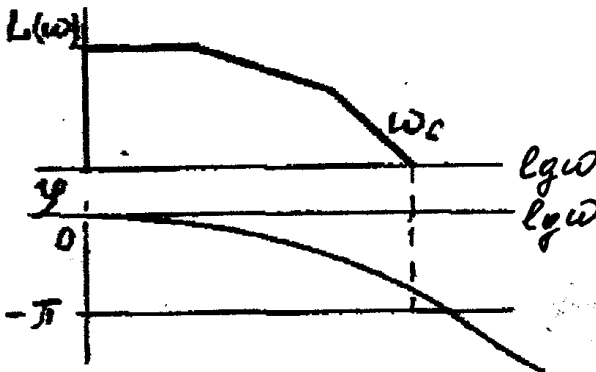


Рисунок 47

ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

- 1 Призначення систем автоматичного регулювання і керування.
- 2 У чому полягає принцип регулювання за збуренням, за відхиленням? Їх переваги і недоліки.
- 3 Етапи проектування систем автоматичного регулювання (САР).
- 4 Структура САР.
- 5 Розімкнуті і замкнуті системи автоматичного регулювання.
- 6 Що являє собою математична модель системи?
- 7 Суть перетворення Лапласа.
- 8 Передатна функція.
- 9 Передатні функції послідовно з'єднаних ланок, паралельно з'єднаних ланок, зустрічно-паралельних ланок.
- 10 Що являє собою перехідна характеристика?
- 11 Дайте визначення сталої часу.
- 12 Дайте визначення, наведіть передатні функції і графіки перехідних процесів для безінерційної, аперіодичної, диференціюючої, інтегруючої, коливальної ланок.
- 13 Назвіть різновиди частотних характеристик.
- 14 Порядок побудови частотних характеристик.
- 15 Стійкість систем автоматичного регулювання.
- 16 Критерії стійкості.
- 17 Логарифмічні частотні характеристики.

ЗАВДАННЯ

1. Скласти диференціальне рівняння і знайти передатну функцію механізму, зображеного на одному з рисунків. Масу рухливих частинок вважати такою, що дорівнює m , момент інерції I , коефіцієнт демпфірування дроселя K_1 , коефіцієнт пружності пружини K_2 . Інші величини наведені у таблиці 1 і на рисунку 48.
2. За даними таблиці 2 побудувати амплітудно-частотну (АЧХ), фазочастотну (ФЧХ) і амплітудно-фазочастотну (АФЧХ) характеристики або визначити параметри передатної функції (варіант 4).

Таблиця 1

Номер вар.	Найменування пристрою ланки	Номер рис.	Вхідна величина	Вихідні величини	Інші дані
1	2	3	4	5	6
1	Тахометр відцентровий	а	Кутова швидкість обертання ω	Переміщення штока h	r – радіус центра мас
2	Коливальна ланка	б	Переміщення поршня X	Зусилля на поршні f	
3	Гідравлічний демпфер	в	Зусилля поршня F	Переміщення поршня X	
4	Вузол регулятора	г	Зусилля поршня F	Переміщення штока X	A – точка зведення маси F_p, F_d – відповідно сила пружини і демпфірування
5	Гідравлічний тахометр із рідинним тертям	д	Кутова швидкість обертання ω	Кут повороту диска, φ	Позиція 3 - пружина
6	Пристрій для вимірювання кутових швидкостей	е	Кут повороту корпусу, $\varphi_{до}$	Кут повороту вантажу, φ_2	
7	Вузол регулятора	ж	Переміщення поршня X_1	Переміщення X_2	
8	Пружинний амортизатор	з	Зусилля F	Переміщення X	Масу не враховувати
9	Ізодромний механізм із рівноплечим важелем	и	X	Y	Масу не враховувати
10	Ізодромний механізм із нерівноплечим важелем	к	X	Y	Масу не враховувати

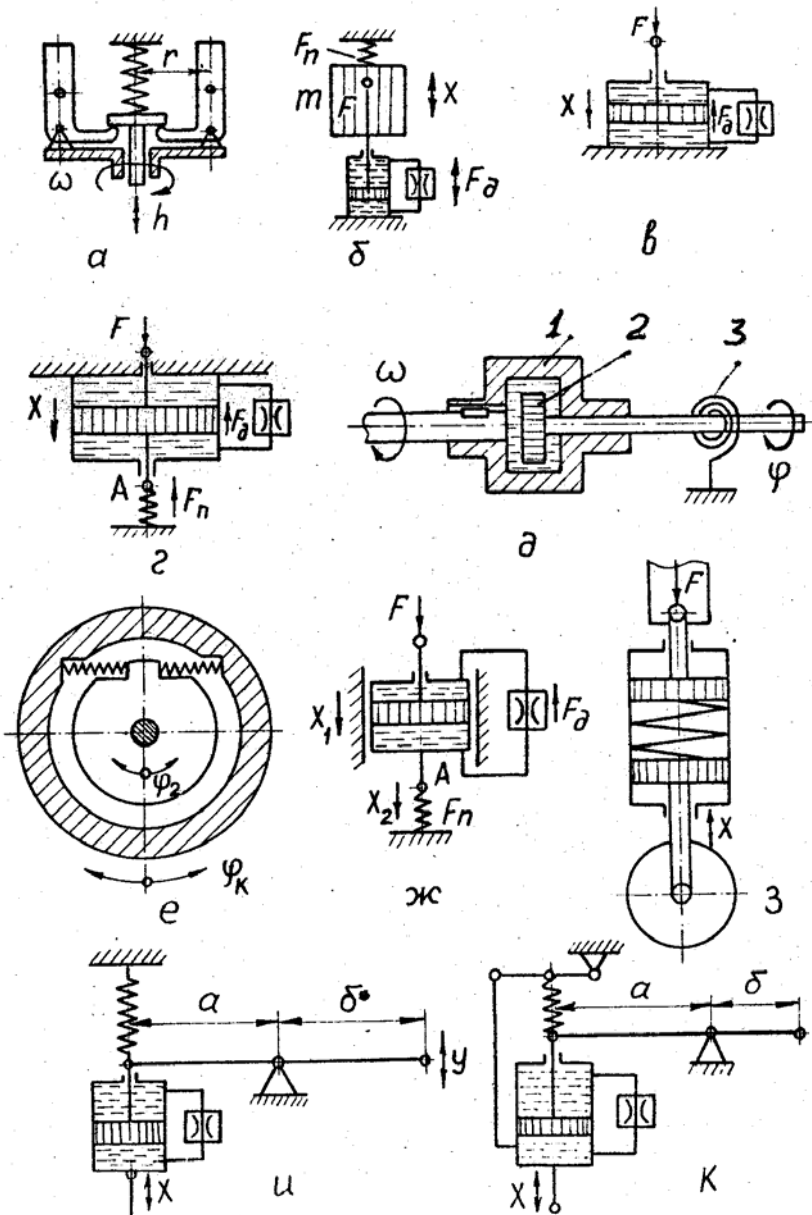


Рисунок 48-Типы механизмов

Номер вар.	Передатна функція	Вихідні дані	Визначити
1	$W(p) = \frac{Tp + K}{Tp + 1}$	T=0,8з; K=5	АЧХ, ФЧХ
2	$W(p) = \frac{1}{T^2 p^2 + 2\xi Tp + 1}$	$\xi=0,5;$ T=0,03с	АФЧХ
3	$W(p) = \frac{K}{(T_1 p + 1) \cdot (T_2 p + 1)}$	K=5; T ₁ =0,08с; T ₂ =0,6с	АФЧХ
4	$W(p) = \frac{K}{Tp + 1}$	A(ω)=2,15; ω=1; φ(ω)= -15°	K, T
5	$W(p) = \frac{K}{p^3 + 2p^2 + 2p + 1}$	K=50	АЧХ, ФЧХ
6	$W(p) = \frac{1}{p(T^2 p^2 + 2\xi Tp + 1)}$	$\xi=0,15;$ T=0,02с	ФЧХ, АФЧХ
7	$W(p) = \frac{K}{Tp + 1}$	T=0,05с; K=100	АЧХ, АФЧХ
8	$W(p) = \frac{K}{p(1+0,1p+0,001p^2+0,0001p^3)}$	K=20с ⁻¹	АФЧХ
9	$W(p) = \frac{K}{(T_1 p + 1) \cdot (T_2 p + 1)}$	K=30с ⁻¹ ; T ₁ =0,1с; T ₂ =0,02с	АЧХ, ФЧХ
10	$W(p) = \frac{K}{P}$	K=5	АФЧХ

ЕЛЕМЕНТИ І ПРИСТРОЇ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

При вивченні тематики призначення і конструкцій функціональних блоків, що входять у структурну схему системи автоматики, слід особливу увагу приділяти сприймальним пристроям (первинним перетворювачам - датчикам), проміжним (підсилювальним) елементам і виконавчим пристроям. Варто знати класифікацію й основні характеристики сприймальних пристроїв, конструкції і принцип дії шляхових перетворювачів, механічних, електричних, пневматичних та інших датчиків.

ЕЛЕМЕНТИ АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ

1 Класифікація елементів

Елементи автоматичних систем за функціональним призначенням, за принципом дії і будови мають велику різноманітність. Так, за функціональним призначенням при розробленні автоматичних систем регулювання найбільш широко застосовуються такі елементи.

Первинні вимірювальні перетворювачі (датчики) - елементи, що вимірюють значення регульованої величини і перетворюють їх в еквівалентні значення сигналу, як правило, іншої фізичної природи, більш зручної для подальшої передачі і виконання. Наприклад, термоелектричний термометр (термопара) вимірює значення температури об'єкта регулювання і перетворює їх в еквівалентні значення термо-ЕРС.

Нормуючі перетворювачі - пристрої, що перетворюють сигнал однієї фізичної природи в еквівалентний уніфікований сигнал іншої фізичної природи. Вони використовуються для забезпечення спільної роботи в автоматичних системах засобів регулювання, що мають різну фізичну основу. Наприклад, електропневматичний перетворювач перетворює електричні сигнали в еквівалентні значення пневматичного сигналу.

Функціональні перетворювачі - це перетворювачі, що при надходженні на вхід сигналу формують на виході зміну сигналу в часі за визначеним законом. Найпростішим прикладом такого функціонального елемента є електродвигун Д системи автоматичного регулювання напруги генератора постійного струму (рис. 7).

При надходженні на електродвигун постійної напруги (вхід елемента) його вал (вихід елемента) починає за лінійним законом переміщати движок реостата R обмотки збудження генератора Г. У загальному випадку закон зміни вихідного сигналу може мати досить складну залежність у функції часу.

Підсилювачі значення сигналу і його потужності - це пристрої, призначені для посилення в разі потреби сигналів, що надходять. Наприклад, коли напруга і потужність вихідного сигналу недостатні для безпосереднього керування електродвигуном Д.

Стабілізатори - елементи, що підтримують значення цього чи іншого сигналу на визначеному рівні і пульсації сигналу, що згладжують.

Комутуючі елементи (розподільники) - прилади, що переключають у визначеній послідовності ланцюги з виходу якого-небудь елемента на входи інших елементів.

Елементи порівняння - елементи, що порівнюють значення двох (чи декількох) сигналів. Вихідний сигнал цих елементів дорівнює різниці сигналів, які надходять на їх вхід. В автоматичній системі функції елемента порівняння часто виконує вимірювальний міст.

Задавальні елементи - елементи, за допомогою яких оператор установлює задане значення регульованої величини.

Регульовальні органи - пристрої, що безпосередньо впливають на об'єкт регулювання для підтримання заданого значення регульованої величини чи зміни її за заданим законом.

Виконавчі механізми - пристрої, що впливають на регульовальний орган і переміщують його (чи змінюють його стан) у бік ліквідації відхилення регульованої величини від заданого значення чи закону її зміни.

Об'єкт регулювання - об'єкт, що є складеним елементом (складовою частиною) автоматичної системи взагалі й автоматичної системи регулювання. При цьому варто мати на увазі, що у функціональному відношенні поняття "об'єкт регулювання" у більшості випадків не збігається з його фізичним (конструктивним) виконанням. Цей збіг є тільки в найпростіших випадках.

Первинні вимірювальні перетворювачі, підсилювачі, функціональні перетворювачі, виконавчі механізми, регульовальні органи, об'єкти регулювання функціонально входять в кожен автоматичну систему регулювання.

Однак фізично окремі з цих елементів системи можуть являти собою єдине ціле, тобто один пристрій може виконувати функції декількох перелічених елементів.

За фізичним принципом дії елементи класифікуються на такі види:

- електричні, магнітні і радіохвильові, що діють за принципом використання електромагнітних процесів з частотами нижче 10^{12} Гц;
- оптичні, що діють за принципом використання електромагнітних процесів з частотами вище 10^{12} Гц;
- механічні, що використовують механічні переміщення твердих тіл;
- гідравлічні, що використовують механічні властивості рідини;
- пневматичні, що використовують механічні властивості газів;
- комбіновані, наприклад, електромеханічні, електрогідравлічні і т.п.

Крім класифікації елементів САР за функціональним призначенням і за фізичним принципом дії, елементи поділяються на пасивні й активні.

Пасивними називаються елементи, що виконують свої функції без використання енергії "з боку". Елементи, що виконують свої функції з використанням енергії від постійного джерела живлення, називаються активними. Прикладами пасивного елемента може бути термометр опору, активного елемента - вимірювальний міст (ВМ). Активні елементи в автоматичних системах застосовуються, як правило, у випадках, коли необхідно на виході одержати сигнал більшої потужності, ніж сигнал, що надходить на вхід. У пасивних елементах потужність вихідного сигналу не може бути більшою, ніж потужність вхідного сигналу.

2 Вимірювальні перетворювачі (датчики)

Основною складовою частиною автоматичної вимірювальної системи є вимірювальний перетворювач (датчик). Датчик є пристроєм, що містить сприймальні елементи систем, елементи систем, що задають, що порівнюють і перетворюють.

За типом сприймальних елементів датчики поділяються на контактні і безконтактні.

За типом задавальних елементів - на граничні й амплітудні, а за кількістю команд - на одно-, дво- і багатокомандні.

Граничні датчики застосовують для фіксації виходу відхилень розміру з поля допуску. Амплітудні датчики контролюють коливання відхилень геометричної форми і взаємного положення.

Кількість команд залежить від призначення автоматичної системи. Однокомандні датчики сортують деталі за одним граничним розміром чи дають одну команду на керування верстатом. Приклад-зняття деталі при досягненні розміру. Двокомандні датчики сортують деталі на придатні, брак "+" і брак "-" чи подають дві команди на керування верстатом.

Залежно від способу перетворення вимірювального імпульсу датчики поділяються на:

- механічні;
- електричні (електроконтактні, індуктивні, ємнісні);
- оптичні;
- радіаційні;
- пневматичні, гідравлічні, комбіновані і т.п.

3 Електроконтактні датчики

Електроконтактні датчики широко застосовуються в системах регулювання, завдяки простоті їхньої конструкції, схемі ввімкнення й обслуговування. Електроконтактні датчики поділяються на 2 групи: з переміщенням контактів, які дорівнюють переміщенню вимірювального штока, - безважільні і важільні.

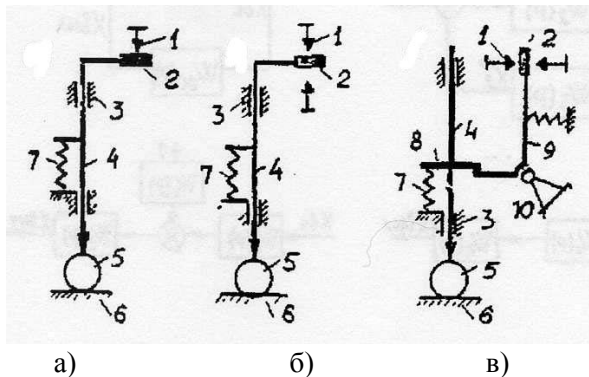


Рисунок 48- Схеми електроконтактних граничних датчиків:

а) одноконтактний безважільний; б) двоконтактний безважільний; в) двоконтактний важільний, де

1 - регульований контакт; 2 - рухливий контакт; 3 - напрямні; 4 - вимірювальний стрижень; 5 -деталь; 6 - столик; 7 - пружина; 8 - повідець; 9 -важіль; 10 - вісь

Датчики з нерівноплечим важелем виготовляють з передатним відношенням від 3:1 до 10:1.

Приклад - електроконтактний перетворювач мод. 203, ціна поділки шкали 0,001 мм, неізолюваний.

Пружинно-важільні системи (рис. 49) виконуються з передатним відношенням 100:1. Механізм має дві колодки 2 і 7. Колодка 7 закріплена на корпусі, колодка 2 підвішена на двох плоских пружинах 8. У рухливу

колодку вкручений вимірювальний шток 1, який спирається кінцем на контрольований виріб. Дві плоскі пружини 6, кожна з яких закріплена нижнім кінцем у своїй колодці, угорі жорстко з'єднані між собою і мають стрижень з кульками для замикання контактів 4. Гвинти 3 і 5 установлюють контакти залежно від контрольованого розміру.

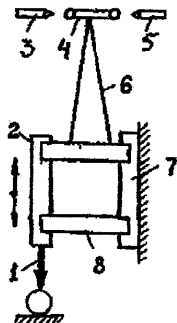


Рисунок 49 - Датчик із пружинно-важільним механізмом: 1 - шток; 2, 7 – колодки; 3, 5 - гвинти; 4 - контакти; 6, 8 - плоскі пружини

4 Індуктивні датчики

Принцип дії індуктивних датчиків полягає в перетворенні лінійного переміщення в зміну індуктивності котушки датчика. Індуктивний метод вимірювання лінійних розмірів базується на використанні контактних індуктивних датчиків, які виконуються простими чи диференціальними.

Прості індуктивні датчики (рис. 50) мають одну котушку з індуктивністю L . При збільшенні розміру контрольованої деталі 1 вимірювальний шток 2 датчика, переборюючи опір пружини 5, натискає на якорь 3, що підвішений на плоскій пружині 4 і може повертатися. Поворот якоря викликає зміна повітряного зазору між магнітопроводом котушки і якорем, що приводить до зміни індуктивності котушки.

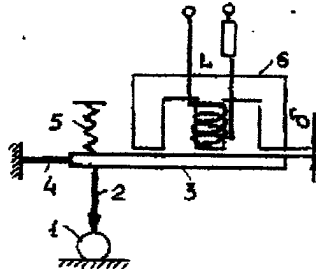


Рисунок 50 - Індуктивний датчик:
 1 - деталь; 2 - шток; 3 - якір; 4 - плоска пружина; 5 - пружина;
 6-магнітопровід

У диференціальному індуктивному датчику (рис. 51) є дві котушки з індуктивностями L_1 і L_2 . Якщо при переміщенні якоря диференціального датчика зазор між якорем і котушкою збільшується, то зазор між якорем і другою котушкою зменшується. У зв'язку з цим змінюється індуктивність обох котушок, що приводить до підвищення чутливості вимірювальної системи в 2 рази. Зі збільшенням первісного зазору чутливість індуктивних датчиків зменшується, однак підвищується лінійність. Живлення - від 6 до 127 В.

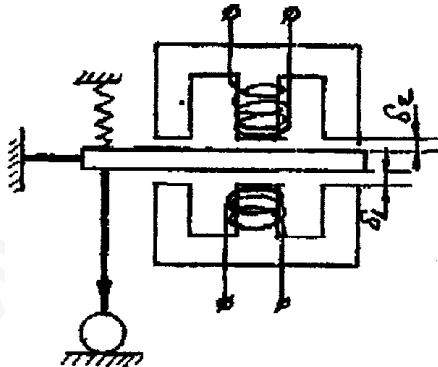


Рисунок 51 - Схема диференціального індуктивного датчика

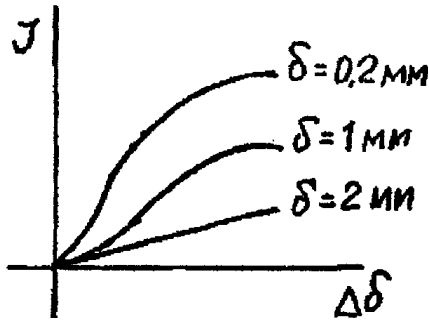


Рисунок 52 - Статична характеристика індуктивного датчика

Індуктивні датчики можуть бути низькочастотними - до 400 Гц, високочастотними - до 10 КГц. Точність вимірювання при робочому ході $50 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$; $0,6 - 0,8 \text{ мм} \pm 2 \text{ мкм}$.

Контактний та індуктивний методи доповнюють один одного. Контактний метод не дає дійсного розміру виробу, індуктивний дозволяє це зробити, контактний метод легко автоматизується, автоматизація індуктивного методу ускладнена. Доцільно в одній системі поєднувати два методи.

5 Ємнісні датчики

Принцип дії ємнісної вимірювальної системи базується на тому, що зі зміною розміру контрольованої деталі змінюється ємність конденсатора датчика. Вимірюючи цю ємність, можна судити про розмір виробу. Ємнісні датчики бувають безконтактні і контактні. Безконтактні застосовуються рідше, ніж контактні.

При контактному методі ємнісні датчики являють собою плоский чи циліндричний конденсатор, одна з пластин якого зв'язана з вимірювальним стрижнем. Датчики мають нелінійну характеристику, тому що ємність конденсаторів змінюється (рис. 53 а і б) зі зміною

зазорів δ за залежністю $C = \frac{\epsilon \cdot S}{4\pi \cdot \delta}$. Для одержання лінійної залежності

застосовують схему (рис. 53в). Ємність за цією схемою визначають за

залежністю $C = \frac{\epsilon \cdot S_0}{4\pi \cdot \delta} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right)$, де ϵ - діелектрична стала; S - площа

перекриття; δ - зазор; S_0 - площа повного перекриття; α - кут зсуву секторів.

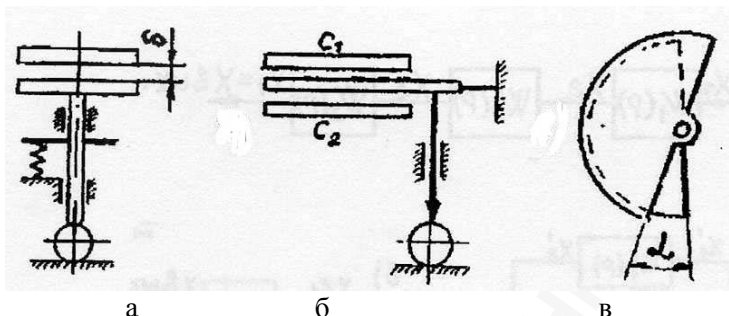


Рисунок 53

Ємнісні датчики працюють тільки з перетворювальними електросхемами. Збільшення ємності датчика можна досягти збільшенням площі або кількості пластин.

Переваги ємнісних датчиків:

- висока чутливість;
- можливий безконтактний контроль.

Недоліки:

- великий вихідний опір, що вимагає ретельного екранування проводів і максимального наближення вимірювальних приладів до датчика.
- складна і недостатньо стабільна електросхема ввімкнення.

6 Пневматичні вимірювальні системи

Переваги пневматичних вимірювальних систем:

- висока точність вимірювання лінійних розмірів (до 2 мкм);
- можливість вимірювання безконтактним способом декількох розмірів одночасно;
- можливість сполучення операцій контролю з обчислювальними операціями (наприклад, контроль суми чи різниці розмірів);
- легко автоматизується.

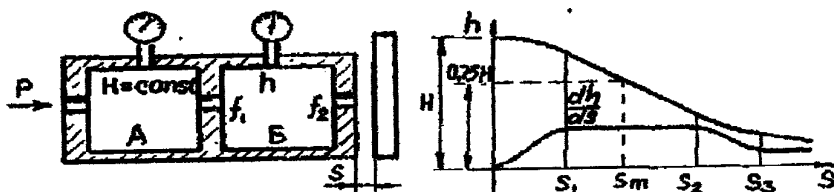


Рисунок 54

Принцип дії системи (рис. 54).

Якщо повітря під постійним тиском H проходить через отвір f_1 у камеру Б, а з неї через отвір f_2 назовні, то тиск між двома отворами в камері залежить від співвідношення площ поперечних перерізів цих двох отворів. Калібрований отвір f_1 називають входним соплом, другий калібрований отвір f_2 - вимірювальним (чи вихідним) соплом, а зазор S - вимірювальним зазором.

Якщо проти вихідного сопла розмістити поверхню контрольованої деталі, то тиск h у камері Б буде зростати при наближенні цієї поверхні до отвору, а при віддаленні - зменшуватися. Тобто величина тиску h є функцією лінійного розміру S .

Характеристика пневматичної системи є величиною змінною. На ділянці від 0 до S_1 характеристика змінюється за законом параболи, а передатне відношення dh/ds мінливе (змінюється від 0 до макс).

Тому для роботи пневматичних вимірювальних пристроїв, як правило, використовують другу ділянку $S_1 - S_2$, яка має максимально і практично постійне передатне відношення. Після ділянки S_3 передатні відношення стають практично постійними, але вони не застосовуються через їх малі значення.

При конструюванні вимірювальної системи прагнуть використовувати всю прямолінійну (робочу) ділянку, забезпечивши максимально можливе при даній межі вимірювання передатне

відношення:

$$S \geq \frac{d_2^2}{4}$$

У пневматичних пристроях диференціального типу чутливий елемент - диференціальний манометр - реагує на різницю тисків Δh у двох гілках системи S_e і S_n , визначаючи алгебраїчну суму S_e і S_n . Для цього діаметри входних і вимірювальних сопел повинні бути відповідно рівними. Тиск повітря, що підводиться до пневматичного вимірювального пристрою, повинен бути постійним.

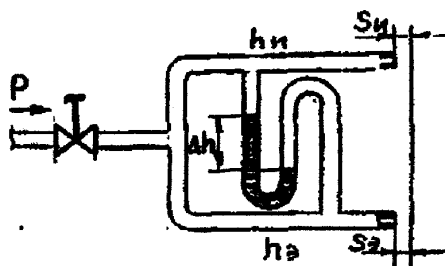


Рисунок 55

Найбільш поширеними є прилади з водяним стабілізатором тиску повітря і водяним манометром (прилад „Солекс”).

Повітря через трубку 3 надходить у верхню частину більш широкої труби 2, що міститься в балоні 1, наповненому водою, що має зверху сполучення з атмосферою. Труба 2 занурена у воду на глибину H . Стиснене повітря витісняє воду з труби 2, надлишок повітря виходить через воду пухирцями в атмосферу. Таким чином, тиск повітря в трубці 2 буде постійним і дорівнювати висоті водяного стовпа H . Через вхідний отвір 4 повітря під постійним тиском надходить у камеру 5 і виходить з неї через вимірювальний отвір 7. Тиск у камері 5, обумовлений величиною зазору 8 між торцем отвору 7 і контрольованою деталлю 8, визначається за різницею рівня води в балоні 1 і скляній трубці 6, що сполучається своєю нижньою частиною з балоном 1 і використовується як манометр.

Недоліки дії приладу: випаровування води, можливість забруднення трубки манометра, інерційність приладу (час спрацьовування 1,2 с - 3,4 с).

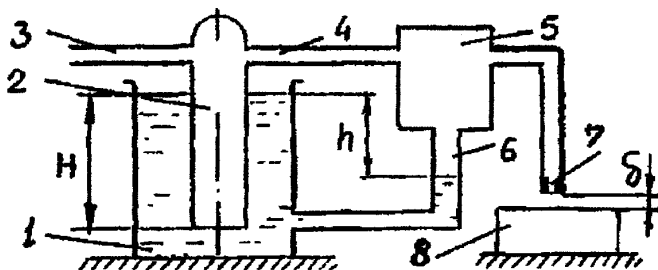


Рисунок 56 - Схема пневматичного вимірювального приладу ("Солекс"): 1 - балон; 2 - труба; 3 - трубка; 4 - вхідна труба камери; 5 - камера; 6 - скляна трубка; 7 - вимірювальний отвір; 8 - деталь

7 Фотоелектричні датчики

Фотоелектричні датчики розміру здійснюють безпосереднє перетворення зміни розміру виробу в зміну променистої енергії світлового потоку за допомогою оптичної системи. Потім промениста енергія світла перетворюється фотоелементами в електричний сигнал. Оптичні системи фотоелектричних датчиків розміру базуються на властивості виробу відбивати світловий потік чи діафрагмувати його.

Безпосереднє відбиття світлового потоку від поверхні деталі використовується, наприклад, в автоматі для контролю шорсткості поверхні кульок (рис. 57).

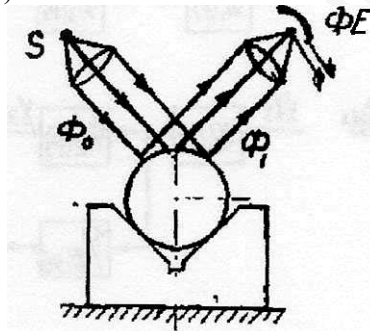


Рисунок 57- Схема фотоелектричного пристрою з безпосереднім відбиттям світлового потоку

Світловий потік Φ_0 подається на поверхню кульки і відбивається від неї на фотоелемент ΦE . Відбитий світловий потік Φ_1 перетворюється в пропорційний йому струм.

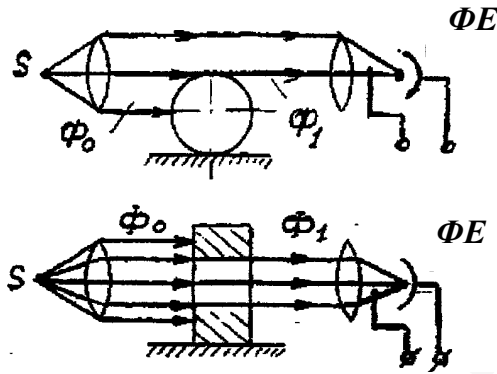


Рисунок 58

Системи з діафрагмуванням світлового потоку будуються за принципом перепинення шляху проходження світлового променя контуром контролюваного виробу. Такі схеми можна будувати як для контролю зовнішніх розмірів деталей, так і для контролю отворів (рис. 58).

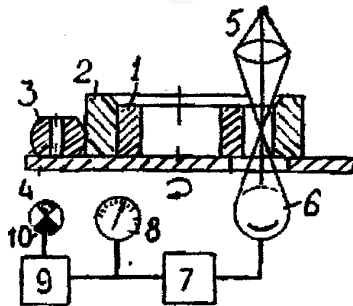


Рисунок 59 - Фотоелектричний прилад для перевірки кілець:

- 1 - контрольоване кільце; 2 - контрольний калібр; 3 - три ролики;
- 4 - пластина; 5 - освітлювач; 6 - фотоелемент, 7 - підсилювач;
- 8 - вимірювальний орган; 9 - сигнальний пристрій

Кільце 1 щільно притискається до контрольного калібра з одного боку, з іншого - розміщене джерело світла 5, що посилає світловий потік через зазор на елемент 6. Під час контролю обійма з кільцем обертається від приводу.

Контроль розміру кульки здійснюється за допомогою відбиття від дзеркала. Відбитий потік практично не змінює своєї величини, але змінює свій напрямок і збуджує один з декількох фотоелементів (рис. 60).

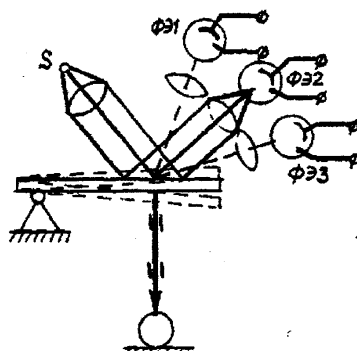


Рисунок 60

Останнім часом застосовують датчики на напівпровідникових опорах. Чутливість нових фотоопорів перевищує в тисячі разів чутливість звичайних вакуумних і газонаповнених фотоелементів.

Похибка таких датчиків не перевищує 0,5 мкм. Датчики дозволяють робити сортування деталей через 1 мкм на 59 груп.

Недоліки фотоелектричних датчиків:

1. Зі зміною напруги змінюються показання.
2. Сторонні джерела випромінювання можуть впливати на точність вимірювань.

8 Електронні датчики (механічні)

Електронний датчик розміру - це електровакуумний прилад, у якому керування електронними струмами здійснюється механічно, шляхом переміщення електродів. Він перетворює лінійне переміщення (зміна розміру) безпосередньо в зміну анодного струму й одночасно підсилює струм. Електронні датчики розміру можуть працювати без підсилювача.

Відомо три типи механічного керування електронними та іонними струмами електронно-механічних та іонно-механічних перетворювачів: подовжнє; зондове; диференціальне.

Подовжнє керування електронним струмом базується на переміщенні анода в напрямку електричного поля лампи. Це переміщення супроводжується зміною напруженості електричного поля всередині приладу, прямо пропорційне зсуву рухомого електрода (рис. 61).

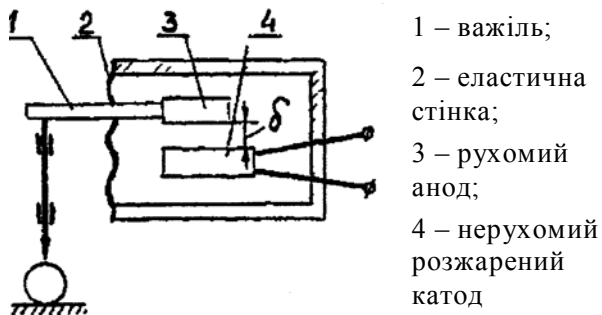


Рисунок 61 - Схема електронного діодного датчика з подовжнім керуванням

Нерухомий розжарений катод 4 і рухомий анод 3, укріплені на важелі 1, що проходить через еластичну стінку 2 колби датчика, зроблені плоскими.

У датчиках зондового керування тонкий розжарений катод переміщається відносно плоских електродів.

Диференціальне керування електронними струмами базується на тому, що керуючий анод 1 скочає в щілинах холодного катода 2, що екранізує його дію на розжарений катод 3. При повному входженні анода струм дорівнює нулю.

При переміщенні анода 1 відносно холодного катода екрануюча дія останнього поступово послаблюється і з'являється швидко наростаючий анодний струм (рис. 62).

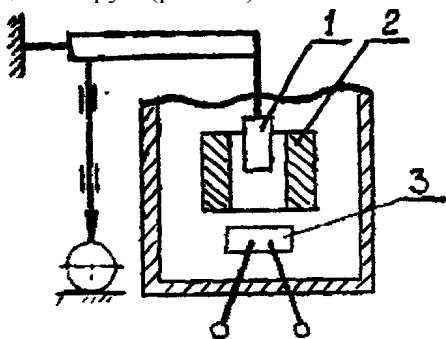


Рисунок 62

9 Радіаційні датчики

У радіаційних вимірювальних системах використовується властивість радіоактивних ізотопів проникати крізь речовину виробу або розсіювати випромінювання. За допомогою спеціальної реєструвальної апаратури можна вимірювати інтенсивність того потоку випромінювання, який розсіявся чи пройшов через виріб. При цьому спостерігається визначена залежність інтенсивності минулого чи розсіяного потоку від розмірів виробу. У такий спосіб можна вимірювати ширину, висоту виробу, товщину його стінок, товщину покриття та ін.

У датчиках радіоактивного контролю технічних процесів використовуються альфа-випромінювання, бета-випромінювання і гамма-випромінювання. Ці випромінювання мають різну проникаючу здатність і різну інтенсивність іонізації газу. Відповідно до їхніх властивостей α - випромінювання застосовується для вивчення параметрів газових середовищ, γ і β - випромінювання використовується для контролю товщини і щільності листових матеріалів.

У радіаційних приладах застосовується кілька типових вимірювальних схем.

Схема прямої дії базується на вимірюванні інтенсивності радіоактивного випромінювання, ослабленого при проходженні через вимірюваний виріб, і є найбільш простою (рис. 63).

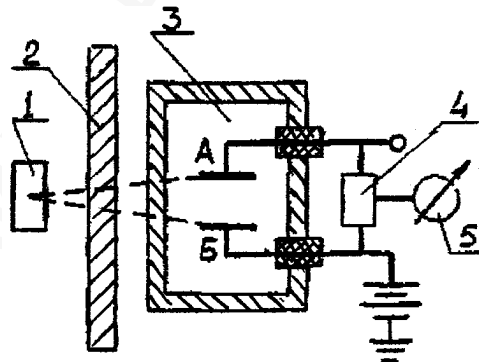


Рисунок 63 – Схема радіаційного методу прямого вимірювання:

1 - джерело випромінювання; 2 - виріб; 3 - іонізаційна камера (детектор); 4 - радіоелектронна апаратура; 5 - відліковий пристрій

Схема складається з джерела випромінювання 1 і детектора (відшукувача) 3, розміщених з двох боків вимірюваного виробу 2, блока радіоелектронної схеми 4 і відлікового пристрою 5. Як детектор застосовують іонізаційну камеру, у якій на деякій відстані один від одного розміщені два електроди А і Б у вигляді пластин. До електродів подається постійна напруга.

Іонізуюче випромінювання від джерела 1 проходить крізь вимірювану деталь 2, впливає на газ, що міститься в камері 3, і утворює на своєму шляху велику кількість іонів атомів повітря. Під дією електричного поля іони переміщуються до електродів А і Б, замикаючи ланцюг, утворюють електричний струм, що може бути виміряний.

Схема прямої дії має істотний недолік - низьку точність, однак у тих випадках, коли не потрібно високої точності, вона знаходить застосування завдяки своїй простоті.

Диференціальна схема вимірювання є більш досконалою (рис. 64).

Принцип її роботи полягає в порівнянні двох потоків, що випускаються від одного джерела випромінювання 3. Один потік радіоактивних випромінювань проходить через еталонний 4, а інший через вимірюваний 2 вироб.

Ослаблені потоки випромінювань реєструються детекторами 1 і 5. Блок порівняння 6 і відліковий пристрій 7 роблять віднімання двох потоків і вилучення різницевого сигналу. У цій схемі похибки вимірювання виникають лише через зміну характеристик детекторів випромінювань і нестабільності блоків схеми.

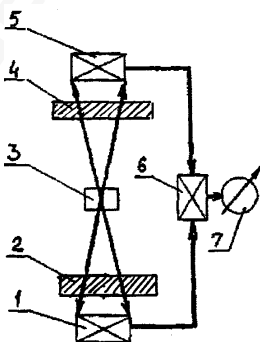


Рисунок 64 - Диференціальна схема вимірювання:

1, 5- детектори випромінювань; 2 - вимірюваний виріб; 3 - джерело; 4 - еталон; 6 - блок порівняння; 7 - відліковий пристрій.

Компенсаційна схема є однією з найбільш ефективних (рис. 65). Ця схема містить у собі два джерела випромінювань 1 і 5, від яких потоки проходять через вимірюваний виріб 2 і компенсаційний клин 4 і попадають на один детектор 3, зв'язаний із блоками радіоелектронної схеми 7. При рівності двох потоків схема не видає робочого сигналу.

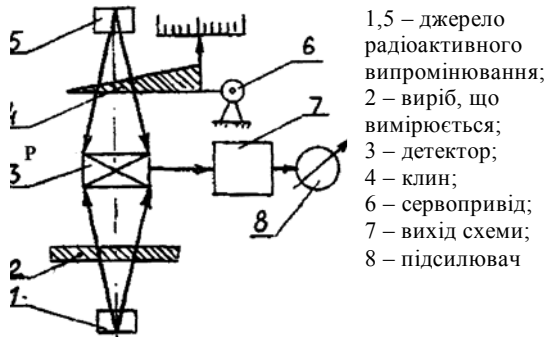


Рисунок 65 - Компенсаційна схема вимірювання

При зміні параметра контрольованого виробу змінюється і поглинання випромінювання у виробі (чи його перекритті). На виході схеми 7 з'являється сигнал розбалансу, який підсилюється і пускає в хід сервопривід 6 із клином 4 доти, поки обидва потоки не компенсуються. Показчик 8 при цьому показує нуль.

Для контролю розмірів у процесі обробки на верстатах зручний щілинний метод (рис. 66), сутність якого полягає у такому: за допомогою діафрагм 2 і 6 з контейнерів 3 і 5 виділяються вузькі пучки радіоактивного випромінювання, що спрямовані за хордою контрольованої деталі 7 і попадають на детектори 1 і 4. Інтенсивність випромінювання залежить від положення деталі у вимірювальному пучку. В міру зняття припуску з деталі при обробці на верстаті і при надходженні деталі з меншим допуском на вимірювальну позицію контрольованого автомата інтенсивність випромінювання, що попадає в детектори змінюється пропорційно зміні розмірів. Щілинний метод контролю дає точність вимірювання до 0,3 - 0,5 мкм.

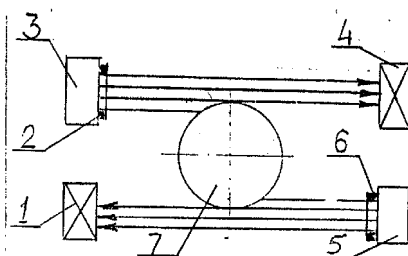


Рисунок 66 – Радіаційний щілинний метод вимірювання:
 1, 4 – детектори; 2, 6 – діафрагми; 3, 5 – контейнери; 7 – деталь, що контролюється

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

- 1 Назвіть різновид елементів автоматики за функціональним призначенням, за фізичним принципом дії.
- 2 Різновиди вимірювальних перетворювачів (датчиків).
- 3 Різновиди електроконтактних датчиків.
- 4 Індуктивні датчики, їх призначення і принцип дії, схеми виконання.
- 5 Ємнісні датчики. Принцип дії. Різновиди. Переваги і недоліки.
- 6 Пневматичні датчики. Принцип дії, різновиди. Переваги і недоліки.
- 7 Оптичні (фотоелектричні) датчики. Різновиди схем вимірювання.
- 8 Електронні датчики. Схеми вимірювання. Радіаційні схеми вимірювання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем.-М.:Машиностроение, 1978.-736 с.
2. Левинг А.И. Математическое моделирование в исследованиях и проектировании станков.-М.: Машиностроение, 1978.- 184 с.
3. Петраков Ю.В. Теорія автоматичного керування в металообробці: Навчальний посібник.-К.: ІЗМН, 1999.- 212 с.
4. Малов А.Н., Иванов Ю.В. Основы автоматизации производственных процессов.-М.: Машиностроение, 1974.-288 с.
5. Силин Р.И., Стадник Я.Ф., Третько В.В. Основы автоматизации и автоматизации производственных процессов: Сборник задач.-Львов: Вища шк., 1984.-120 с.