

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АВТОМАТИКИ

Методичні вказівки до виконання самостійної роботи студентів

СУМИ – 2022

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Інженерно-технологічний факультет
Кафедра енергетики та електротехнічних систем**

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АВТОМАТИКИ

Методичні вказівки до виконання самостійної роботи студентів

**для студентів 3 та 1 с.т. курсу спеціальності 141 "Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка"
денної і заочної форм навчання
освітнього ступеня «Бакалавр»**

СУМИ – 2022

Укладачі: **Кравченко В.О.**, к.ф.-м.н., ст. викладач кафедри енергетики та електротехнічних систем
Вольвач Т.С., асистент кафедри енергетики та електротехнічних систем
Лисенко В.В., завідувач. навчально-методичним кабінетом.

Кравченко В.О., Вольвач Т.С., Лисенко В.В.

К77 Теоретичні основи автоматики: методичні вказівки до виконання СРС / В.О.Кравченко, Т.С.Вольвач, В.В.Лисенко. - Суми, 2022. – 72 с.

В роботі зібраний матеріал з теоретичних основ автоматики, який виноситься на самостійне опрацювання студентами. Представлено додаткові матеріали з теорії стійкості систем керування, теорії якості САК та її оцінки, про технічні засоби автоматики і автоматизації, їх характеристики.

Вказівки призначенні для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Рецензенти:

Хурсенко С.М., к.ф.-м.н., доцент, зав. кафедри охорони праці та фізики СНАУ;

Лобода В.Б., професор кафедри енергетики та електротехнічних систем СНАУ.

Відповідальний за випуск:

Чепіжний А.В., к.т.н., зав. кафедри енергетики та електротехнічних систем.

Рекомендовано до видання навчально-методичною радою інженерно-технологічного факультету. Протокол № 6 від «25 » травня 2022 року

ЗМІСТ

Тема 1. Вступ. Загальні поняття про системи автоматичного керування	5
1.1. Загальні відомості та визначення теорії систем автоматичного керування (історичний огляд)	5
1.2. Приклади САК	7
Тема 2. Основні принципи автоматичного керування	
2.1. Принципи розімкненого керування. Принцип керування за задавальною дією	10
2.2. Принцип комбінованого керування	10
Тема 3. Класифікація систем автоматичного керування	12
Тема 4. Опис систем автоматичного керування	15
4.1. Основні задачі при вивченні САК	15
4.2. Опис елементів в статичному режимі	17
4.3. Типові вхідні сигнали	18
Тема 5. Представлення динаміки систем автоматичного керування типовими динамічними ланками	20
5.1. Ланка з постійним запізненням	20
5.2. Диференціююча ланка	21
5.2. Перетворення структурних схем	21
Тема 6. Стійкість систем автоматичного керування та методи її оцінювання	23
6.1. Загальні умови стійкості систем автоматичного регулювання	23
6.2. Алгебраїчні критерії стійкості. Критерій стійкості Гурвіца	25
6.3. Частотні критерії стійкості. Критерій стійкості Найквіста	28
6.3. Логарифмічний критерій стійкості	29
Тема 7. Якість систем автоматичного керування у перехідному та усталеному режимах	31
7.1. Показники якості систем автоматичного керування	31
7.2. Застосування кореневих методів для оцінки показників якості	33
7.2.1. Метод кореневого годографа	33
7.2.2. Метод D-розбиття	34
7.2.3. Метод зміщеного рівняння	35
7.3. Частотний метод побудови перехідного процесу	36
Тема 8. Елементи систем автоматичного керування	38
8.1. Класифікація вимірювальних перетворювачів	38
8.2. Датчики переміщення	41
8.2.1. Механічні чутливі елементи датчиків	41
8.2.2. Потенціометричні чутливі елементи	42
8.2.3. Диференційний індуктивний датчик	43
8.2.4. Індукційні чутливі елементи	44
8.3. Датчики температури, тиску, рівня, витрат, лінійних та кутових переміщень, швидкості, зусиль, моментів, деформації, вологості, густини, освітленості, хімічного складу речовин тощо та їх характеристики	47
8.3.1. Датчики PIR	47

8.3.2. Датчик Холла	47
8.3.3. Фотоелектричні датчики	48
Тема 9. Пристрої задавання, порівняння та засоби відображення інформації	49
9.1. Пристрої задавання та порівняння	49
9.2. Застосування елементів порівняння	50
9.3. Цифро-аналоговий перетворювач	54
Тема 10. Елементи та пристрої дискретної дії	55
10.1. Релейні елементи	55
10.2. Логічні схеми	59
10.3. Принципи побудови схем	60
Тема 11. Виконавчі елементи систем автоматики	
11.1. Характеристики виконавчих пристроїв	63
11.2. Електромагнітні виконавчі елементи (соленоїдні)	63
11.3. Електромагнітні муфти	64
11.4. Пневматичні та гідравлічні виконавчі механізми	65
Тема 12. Автоматичні регулятори	67
12.1. Комбіновані регулятори та їх структури	67
Список рекомендованої літератури	69

Тема 1. Вступ. Загальні поняття про системи автоматичного керування

1.1. Загальні відомості та визначення теорії систем автоматичного керування (історичний огляд)

Теорія автоматичного керування з'явилася в другій половині 19 століття спочатку як теорія регулювання. Широке застосування парових машин викликало потребу в регуляторах, тобто в пристроях, що підтримують стійкий режим роботи парової машини. Це дало початок науковим дослідженням в області керування технічними об'єктами.

Як приклад автоматичного керування розглянемо роботу одного з перших технічних пристроїв, керуючих об'єктом автоматично – відцентрового регулятора для підтримки сталості ходу парової машини, винайденого англійським механіком Джеймсом Уаттом в 1784 р. (рис. 1.1).

Цей регулятор складається з двох вантажів 1, підвішених на шарнірах уздовж осі вертикального вала 2, зв'язаного через редуктор з вихідним валом парової машини 3. Важелі вантажів з'єднані із втулкою 4, що може переміщуватися уздовж вала 2. Втулка 4, у свою чергу, з'єднана важелем із заслінкою 5, положення якої визначає переріз отвору, через який пар надходить із казана в циліндр машини.

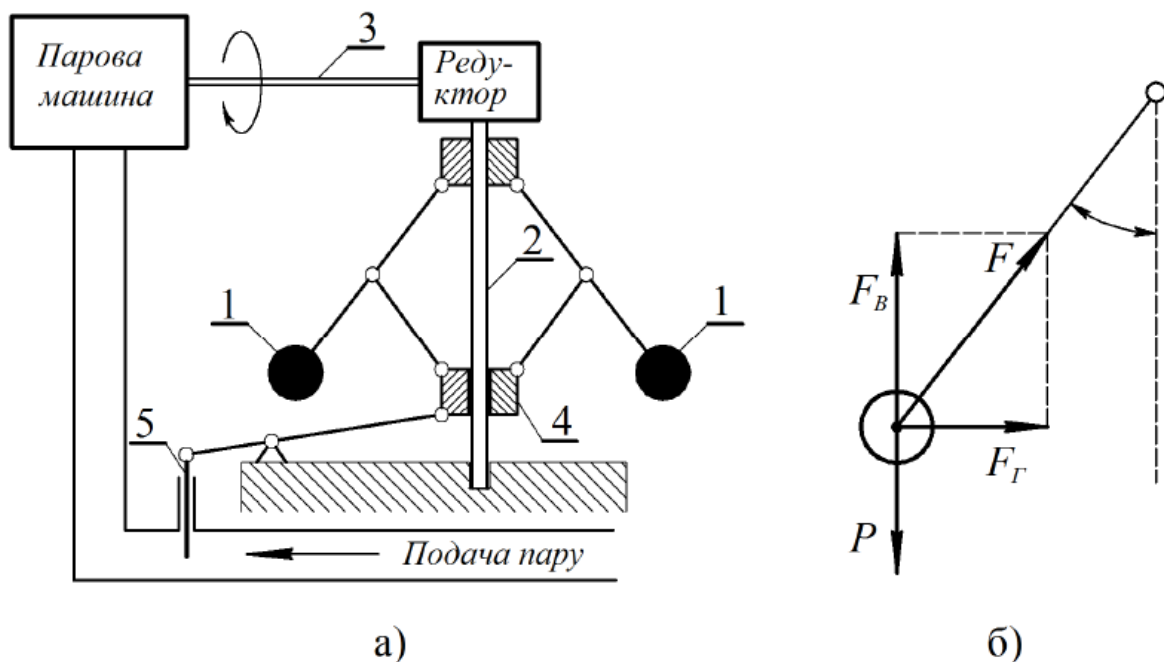


Рисунок 1.1 - Регулятор Уатта:
а) принципова схема; б) схема діючих сил

При пуску машини її вихідний вал 3 приходить в обертання з коловою швидкістю ω , а кожний з вантажів починає зазнавати впливу двох сил (див. рисунок): сили пружності важеля F (або її вертикальної F_g і горизонтальної F_g складових) і сили ваги P . Якщо величина ваги P , кут α і передаточне число редуктора підібрані такими, що при цьому $F_g > P$, то вантажі почнуть зміщуватися вгору і у сторони доти, поки не наступить стан динамічної

рівноваги, коли $F_6 = P$. У результаті цього заслінка 5 приймає деяке положення, що відповідає певній швидкості.

Застосування такого регулятора забезпечує з певною точністю сталість швидкості ω незалежно від величини навантаження на валу машини і параметрів робочого пару. Наприклад, якщо з якої-небудь причини машина збільшить швидкість обертання, то відцентрова сила F_c також збільшиться, що приведе до зростання F_a , отже, і F_6 . Стан рівноваги порушиться і вантажі почнуть підніматися вище, що приведе до більшого закриття заслінки, зменшення витрати пару і, отже, до зниження ω .

Парова машина не мала здатність стійко забезпечувати необхідний режим роботи, тобто не володіла «самовирівнюванням». Наявність підключеного регулятора теж іноді приводила до несподіваних результатів – машина починала «розгойдуватися». Це викликало необхідність проведення відповідних теоретичних досліджень. Особливо варто виділити три фундаментальні теоретичні роботи, що містили в собі, власне кажучи, виклад основ автоматики: робота Д.К. Максвелла «Про регулятори» (1866) і роботи І.А. Вишнеградського «Про загальну теорію регуляторів» (1876) і «Про регулятори прямої дії» (1877). Обоє авторів здійснили системний підхід до проблеми, розглянувши регулятор і машину як єдину динамічну систему. Математичний опис системи був спрощений шляхом переходу до дослідження малих коливань і лінеаризованих диференціальних рівнянь, що дозволило сформулювати загальний методологічний підхід до дослідження різномірних за фізикою і конструкцією систем, закласти основи теорії стійкості й установити ряд важливих загальних закономірностей регулювання за принципом зворотного зв'язку.

Роботи І.А. Вишнеградського містять, крім цінних практичних рекомендацій, також основи ряду сучасних методів дослідження стійкості і якості регулювання (діаграми стійкості й розподілу коренів, виділення областей стійкості та монотонності та ін.). Саме І.А. Вишнеградський є основоположником теорії автоматичного регулювання.

Робота Д.К. Максвелла залишилася в той час непоміченою, тому що вона розглядала нехарактерний об'єкт, явно корисних практичних висновків не містила і рекомендувала практично непридатні для машин того часу астатичні регулятори. Її роль була оцінена пізніше, коли теорія автоматичного регулювання вже сформувалася в самостійну наукову дисципліну.

Теорія регулювання стала стимулювати розробки математичного плану. Е. Раус розробив алгоритм для оцінки розташування коренів характеристичного рівняння і стійкості, А. Гурвіц вивів алгебраїчний критерій стійкості.

Зміни САК, пов'язані з ускладненням структури і підвищенням вимог до швидкості протікання, точності і якості процесів, привели до необхідності створення більш ефективних методів дослідження систем. З'явилися частотні методи, що дозволяють сполучати аналітичні й наочні графічні прийоми, теоретичні й експериментальні методи дослідження. Х. Найквіст в 1932 р.

запропонував критерій стійкості радіотехнічних підсилювачів зі зворотним зв'язком, заснований на властивостях частотної характеристики розімкнутої системи. У 1938 р. в роботі «Гармонійний метод у теорії регулювання» А.В. Михайлов обґрунтував доцільність використання частотних методів у теорії регулювання. У 1946 р. Г. Боде і Л. Мак Кіл ввели логарифмічні частотні характеристики. Р. Флойд для дослідження якості запропонував наближену розбивку дійсної частотної характеристики на трапеції. М. Браун, А. Хол, Д. Кемпбелл, Г. Честнат, А.В. Михайлов, В.В.Солодовников та ін. завершили розробку частотних методів синтезу й розрахунку систем, надавши їм сучасну форму, зручну для інженерних розрахунків, у тому числі при використанні сучасних комп'ютерних технологій.

Відзначимо, що термін “автоматичне керування” слід відрізняти від терміна “автоматизоване керування”, під яким розуміється керування з обов'язковою участю людини.

Виявилось, що результати і висновки даної теорії можуть бути застосовані до управління об'єктами різної природи з різними принципами дії. В даний час сфера її впливу розширилася на аналіз динаміки таких систем, як економічні, соціальні і т. п. Тому колишня назва “Теорія автоматичного регулювання” замінена на ширшу - “Теорія автоматичного управління”.

1.2. Приклади САК

Прикладом САК може бути розглянута вище схема відцентрового регулятора (рис. 1.1).

Розглянемо спрощену принципову схему САК частотою обертання електродвигуна (рис.1.2). При збільшенні моменту навантаження M_n (збільшується корисне навантаження на валу двигуна або ж збільшується тертя в підшипниках, редукторі тощо, що є збільшенням збурювальної дії $f(t)$)—зменшується частота обертання двигуна n . Але це приводить до збільшення якісного струму. Унаслідок цього зростають сумарні ампервитки $(I \cdot W)$ компенсаційної обмотки W_k , яка є зв'язком за збуренням, зростає потік компенсаційної обмотки, який, збігаючись за напрямком із керувальним потоком ЕМП – потоком обмотки керування $W_{кер}$, додається до нього, збільшуючи тим самим напругу на виході ЕМП, а отже, частоту обертання двигуна, в результаті чого швидкість обертання ротора двигуна M залишається незалежною від зміни моменту навантаження.

Переміщенням повзуна R_w можна досягти: повної компенсації впливу M_n на оберти двигуна (1), недокомпенсації (2), перекомпенсації (3) порівняно із залежністю $n=f(M_n)$ без компенсації, тобто без зв'язку із збуренням (4) (рис. 1.3).

Дана схема реалізує принцип керування за збуренням (вимірюється не частота обертання двигуна, а момент навантаження, що є збурюючою дією). Замінивши компенсаційну обмотку на тахогенатор, одержимо схему, в якій реалізується принцип керування за відхиленням (оскільки при цьому

здійснюється безпосереднє вимірювання вихідної величини – частоти обертання).

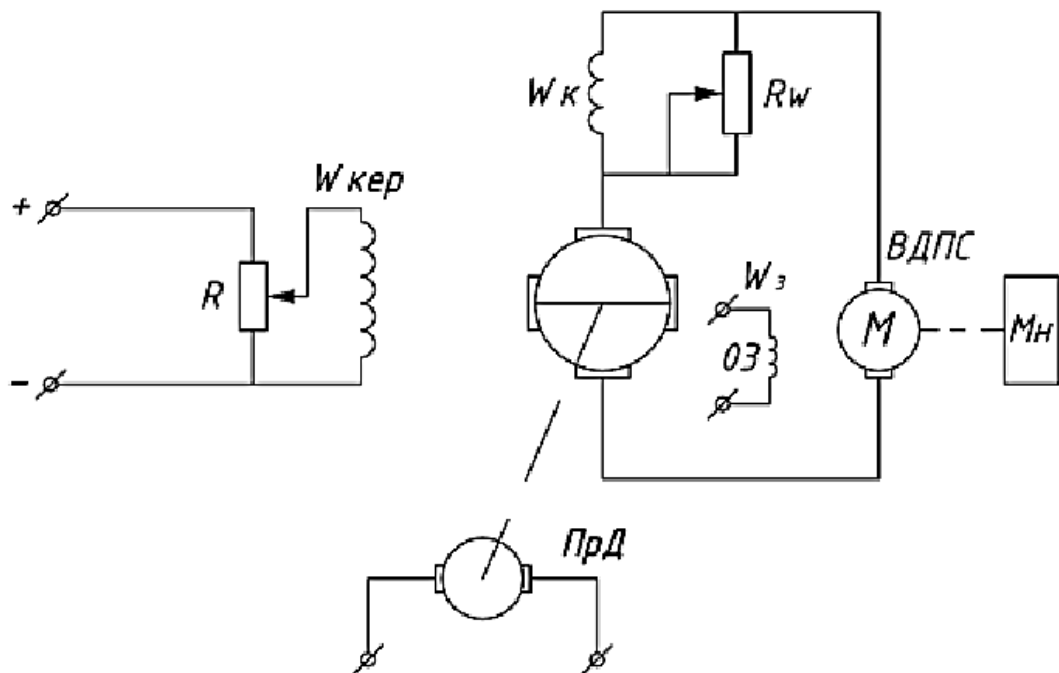


Рисунок 1.2 – Принципова схема САК обертами електродвигуна

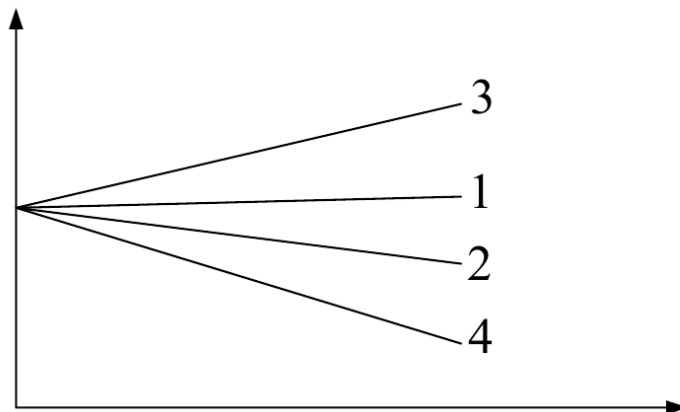


Рисунок 1.3 – Статичні характеристики системи при різних ступенях компенсації

Ще одним прикладом системи керування є електронний стабілізатор напруги компенсаційного типу (рис. 1.4).

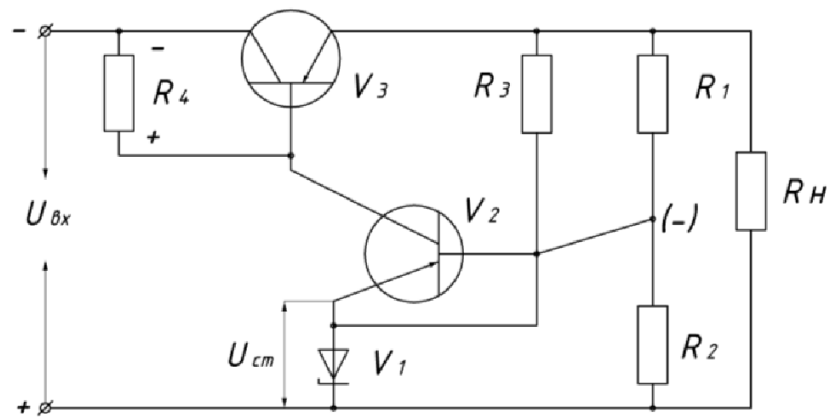


Рисунок 1.4 – Принципова схема електронного стабілізатора напруги

В даній схемі при будь-якій зміні $U_{вх}$ (збурюючій дії) має бути $U_{вих} = const$. Задаюча дія – еталонна напруга стабілітрона $U_{см} = const$.

Схема працює таким чином. При збільшенні $U_{вх}$ збільшується негативний потенціал на базі транзистора V_2 , і при незмінному потенціалі на емітері (за рахунок стабілітрона) збільшується напруга U_{BE} транзистора V_2 , яка відкриває транзистор V_2 . Колекторний струм через нього збільшується, а потенціал на колекторі стає більш позитивним. Це зростання позитивного потенціалу колектора транзистора V_2 передається на базу регулюючого транзистора V_3 , колекторний струм транзистора V_3 зменшується, опір транзистора зростає. Внаслідок цього збільшується падіння напруги на транзисторі V_3 , тобто приріст вхідної напруги $U_{вх}$ буде падати в основному на транзисторі V_3 , і напруга на виході стабілізатора залишається незмінною.

Тема 2. Основні принципи автоматичного керування

2.1. Принципи розімкненого керування. Принцип керування за задавальною дією

Цей принцип є принципом розімкненого керування і використовують у разі, коли основним фактором, що викликає відхилення $Q(t)=x(t)-y(t)$, є зміна задавальної дії на вході системи.

Структурна схема САК, що реалізує цей принцип, показана на рис. 2.4.



Рисунок 2.1 – Структурна схема САК із принципом розімкненого керування

Принцип керування за задавальною дією полягає в тому, що для усунення або зменшення відхилення $Q(t)=x(t)-y(t)$, яке виникло унаслідок зміни задавальної дії, АКП формує керувальну дію $u(t)=f[x(t)]$ із цієї задавальної дії з урахуванням статичних та динамічних характеристик об'єкта. Тобто при зміні АКП вимірює різницю Δx і враховує останню при формуванні $u(t)$, унаслідок чого і компенсується відхилення $Q(t)=x(t)-y(t)$.

Розглянуті системи є розімкненими САК, у яких процес керування не залежить від результатів, тобто керована величина $y(t)$ не вимірюється і не проводиться жодних дій із нею для зменшення відхилення $y(t)$ від $x(t)$.

2.2. Принцип комбінованого керування

Комбіновані САК поєднують у собі принцип керування за відхиленням та принцип розімкненого керування (за збуренням або за заданою дією). На рисунку 2.2 подана функціональна схема комбінованої САК зі зв'язком за збурювальною дією; на рис. 2.3 – функціональна схема комбінованої САК із зв'язком за задавальною дією.

У комбінованих системах компенсаційний зв'язок за основним збуренням (задавальною дією) усуває складову похибки, викликану цим збуренням (змінюю задавальної дії), натомість головний зворотний зв'язок сприяє зменшенню похибок, що спричинені другорядними збуреннями, компенсаційні зв'язки для яких у системі не передбачені. Якщо за допомогою компенсаційних зв'язків неможливо повністю усунути похибки, спричинені основними збурювальними (задавальними) діями, то залишкові похибки також зменшуються за рахунок дії зворотного зв'язку.

Прикладом комбінованої системи зі зв'язком за основним збуренням є система рис. 2.4, якщо в ній у коло навантаження ЕМП увімкнути компенсаційну обмотку.

У такій системі можливе повне усунення тієї частини відхилення, що викликана зміню моменту навантаження – за допомогою зв'язку за збуренням, реалізованого на компенсаційній обмотці ЕМП W_k . Решта ж відхилення, викликана іншими факторами, зменшується дією головного

зворотного зв'язку. Отже, принцип керування за збуренням у цій системі поєднується з принципом керування за відхиленням.

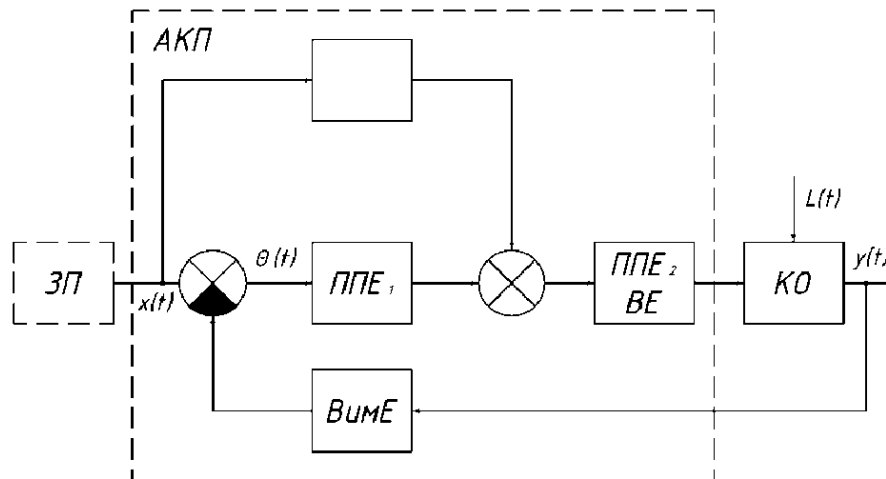


Рисунок 2.2 – Функціональна схема комбінованої САК зі зв'язком за збурювальною дією

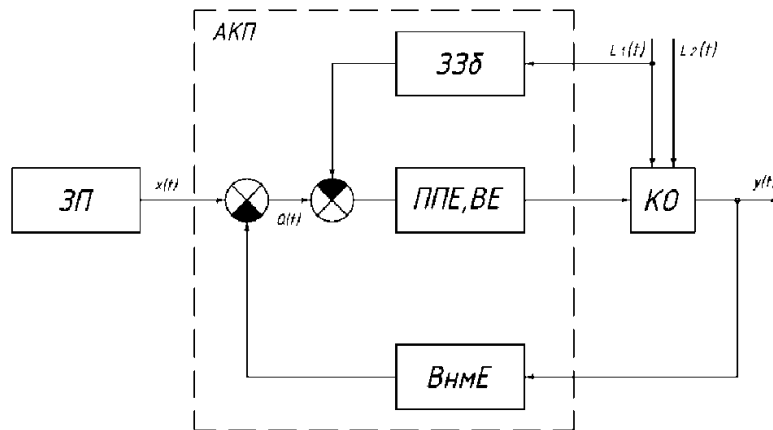


Рисунок 2.3 – Функціональна схема комбінованої САК зі зв'язком за задавальною дією

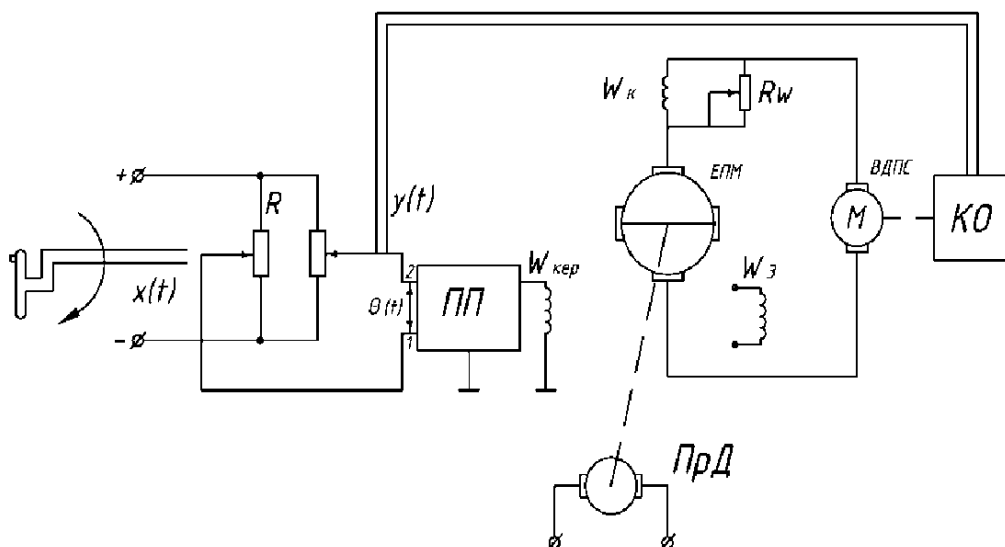


Рисунок 2.4 – Принципова схема комбінованої САК

Тема 3. Класифікація систем автоматичного керування

За **принципом роботи** (алгоритмом керування) САК поділяють на:

- **розімкнуті;**
- **замкнуті;**
- **комбіновані.**

До *розімкнутих* відносять системи, в яких керування здійснюється за збуренням. Прикладом, такої системи може бути автоматизована районна котельня, яка подає гарячу воду в систему теплозабезпечення мікрорайону. Регулювання температури теплоносія в ній може здійснюватись залежно від температури навколишнього середовища.

До *замкнутих* відносять системи, яких здійснюється керування за відхиленням. Прикладом таких систем є регулятор Уатта.

До *комбінованих* систем керування відносять ряд складних систем, які встановлюють в автомобілях, в гідро - та теплогенераторах, найрізноманітнішій складній техніці. Ці системи мають декілька контурів регулювання.

За **характером зміни величини**, що визначають роботу окремих елементів, САК поділяються на системи **неперервної дії** та **дискретні** системи. В *неперервних* системах сигнали на виході елементів є неперервними функціями часу, причому вихідна величини будь-якого елемента в кожний момент часу визначається значення вхідної величини. Всі досі розглянуті САК є неперервними системами.

В *дискретних* системах вихідні величини елементів можуть приймати дискретні у часі характери, не бути неперервними (наприклад, послідовність імпульсів, цифрові коди тощо). В таких системах необхідно мати дискретний елемент як перетворювач неперервної величини у дискретну.

Розрізняють такі дискретні системи:

- **релейні;**
- **імпульсні,**
- **цифрові.**

У системах *релейної* дії вихідна величина змінюється при деяких граничних значеннях вхідної величини, в системах *імпульсної* дії – через певні проміжки часу, а в *цифрових* системах і те, й інше.

В залежності від **способу налаштування параметрів** САК поділяються на **неадаптивні** і **адаптивні** системи.

Неадаптивними є всі розглянуті вище САК. *Адаптивні* системи – це системи, які в залежності від умов роботи (характеристик зовнішніх дій і параметрів самої системи) змінюють свою настройку, забезпечуючи для кожної сукупності умов найвигідніший режим роботи. Такі САК використовуються для керування об'єктами властивості, чи умови експлуатації яких недостатньо відомі або суттєво непостійні, наприклад, САК апаратами, які спускаються на віддалені планети сонячної системи. Ці системи найбільш досконалі.

Неадаптивні системи здатності пристосовуватись до зміни зовнішніх умов не мають. У них зміна параметрів з метою забезпечення оптимальності процесу регулювання, або відсутня, або її здійснює людина.

За **математичним описом** роботи САК поділяють на **лінійні** (для математичного опису яких використовують лінійні диференціальні рівняння); **нелінійні** (для математичного опису яких використовують нелінійні диференціальні рівняння); **стаціонарні** (параметри яких на протязі часу не змінюються); **нестаціонарні** (параметри яких на протязі часу змінюються) та інші.

Лінійні системи - це системи, які описуються лінійними диференціальними рівняннями. Для лінійних систем справедливий принцип суперпозиції. Принцип суперпозиції (накладання) полягає в тому, що реакція системи на суму дій пропорційна сумі реакцій на кожен дію зокрема. Принцип суперпозиції може виконуватись в якихось певних межах навантажень. Діапазон, в якому справедливий принцип суперпозиції називають діапазоном лінійності.

Нелінійні системи – це системи, в яких хоча б для однієї ланки не виконується принцип суперпозиції. Такі системи описуються нелінійними диференціальними рівняннями. Аналіз їх складніший, ніж лінійних систем. Досить часто вдається звести аналіз нелінійних до аналізу лінійних систем. Методи такого приведення називаються **лінеаризацією**.

За **змінюю параметрів системи в часі** САК поділяють на:

- **стаціонарні;**
- **нестаціонарні.**

Стаціонарна система - це така система, параметри якої незмінні протягом часу.

Нестаціонарна система має параметри, які змінюються з часом. При математичному описі таких систем деякі коефіцієнти диференціального рівняння динаміки системи є функціями часу.

Реакція стаціонарної системи на одне і те ж збурення не залежить від моменту, коли збурення відбулося. Для нестаціонарних систем реакція системи змінюється з часом.

Класифікація за **кількістю контурів регулювання**:

- **одноконтурні;**
- **двохконтурні;**
- **багатоконтурні САК.**

Системи з комбінованим керуванням є багатоконтурними САК.

За **кількістю вихідних координат** системи:

- **одномірні;**
- **багатовимірні.**

Одновимірні системи – це системи, які керують дію тільки за однією вихідною величиною, наприклад, холодильник, двигун з регулятором швидкості, є одномірними системами.

Багатовимірні системи – це системи, які здійснюють керування за декількома вихідними величинами. Наприклад, САК зенітної ракети

здійснює керування як за напрямком руху (азимутом), так і за нахилом до горизонту. САК генератора електростанції виконує керування за частотою та напругою.

Серед багатовимірних САК розрізняють системи зі **зв'язаним** і з **незв'язаним** керуванням. САК зенітної ракети має незв'язане керування, оскільки керувати рухом за азимутом може одна система, а рухом за кутом нахилу до горизонту інша незалежна система. У випадку електричного генератора ситуація дещо складніша, оскільки зміна частоти обертання генератора приводить і до зміни напруги, тому система керування повинна бути дещо складніша, щоб забезпечити потрібну частоту струму при заданій величині напруги. Така система керування є зв'язаною.

Залежно від наявності додаткового джерела енергії САК бувають **прямої** і **непрямої** дії.

САК **прямої** дії не мають додаткових джерел енергії та підсилювачів потужності в системі регулювання.

САК **непрямої** дії містять підсилювачі потужності і споживають енергію для здійснення керування від зовнішніх джерел.

Тема 4. Опис систем автоматичного керування

4.1. Основні задачі при вивченні САК

Основними задачами при вивченні САК є:

Аналіз – це вивчення роботи САК у різних умовах експлуатації, вивчення характеристик уже існуючих САК.

Синтез – це створення САК, які задовольняють наперед заданим вимогам, тобто це розробка систем керування відповідно до поставлених завдань, розробка нових алгоритмів керування, реалізація алгоритмів керування у конкретних САК.

Більш простішою є завдання аналізу, тому що ми вже маємо певну систему й потрібно вивчити її роботу, зробити прогноз, як ця система поведе себе в тих чи інших умовах. Таке вивчення можна здійснити різними шляхами, а саме:

- безпосередньо на самій системі, шляхом вимірювання, експерименту;
- експериментально за допомогою фізичної моделі системи;
- теоретичним шляхом;
- шляхом математичного моделювання.

Кожен з методів має свої позитивні сторони і недоліки. Безпосереднє вивчення роботи системи, проведення експериментальних досліджень дає найбільш достовірний і точний результат. Проте ми не зможемо дослідити роботу системи в ряді режимів, особливо в режимах, близьких до аварійного, а ці режими при вивченні системи цікавлять нас найбільше. Самі експерименти із системою, як правило, досить затратні. Виконати повний цикл досліджень на деяких системах практично неможливо, як наприклад, ми не можемо досліджувати характеристики керування на працюючому ядерному реакторі, космічному кораблі чи зенітній ракеті.

Дешевше і більш повне вивчення може бути здійснене за допомогою фізичної моделі. Тут також є певні переваги і недоліки. Перевага полягає в тому, що фізична модель завжди спрощена й дешевша. Модель можна піддавати найрізноманітнішим випробуванням. Недоліками використання моделі є те, що модель треба створити, на що потрібні певні затрати часу, матеріальних і фінансових ресурсів. Крім того, модель завжди спрощена, не може дати відповідь на всі запитання.

Теоретичний шлях – найбільш повний і розвинутий. Він дозволяє виконати аналіз будь-якої системи в будь-яких режимах роботи. Він є самим дешевим, не потребує значних матеріальних витрат. Проте теоретичне вивчення САК потребує глибоких спеціальних знань і високої кваліфікації спеціаліста. Його можуть виконати тільки спеціалісти, які в достатній мірі вивчили властивості САК, принципи їх роботи і володіють сучасними методами аналізу.

Теорія автоматичного керування вивчає роботу САК теоретичним шляхом. Вона використовує передові досягнення сучасної науки, результати, одержані математиками протягом століть розвитку науки. Під час

теоретичних досліджень використовуються й експериментальні дані, одержані на найрізноманітніших САК та їх моделях.

4.2. Опис елементів в статичному режимі

Режим роботи САК, в якому керована величина і всі проміжні величини не змінюються в часі, називається **статичним**. Будь-яка ланка і САК загалом у цьому режимі описується рівняннями статички виду $y=F(u,f)$, у яких відсутній час t . Відповідні їм графіки називаються статичними характеристиками. Статична характеристика ланки з одним входом u може бути кривою $y=F(u)$ (рис.4.1). Якщо ланка має другий вхід за збуренням f , то статична характеристика визначається сімейством кривих $y=F(u)$ при різних значеннях f , або $y=F(f)$ при різних u .

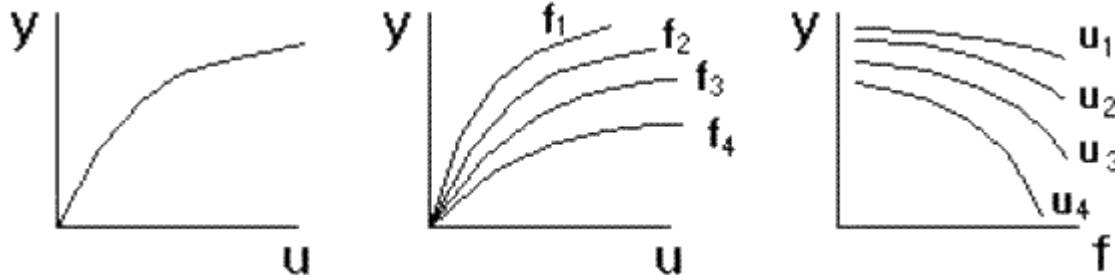


Рисунок 4.1 – Статичні характеристики ланок

Прикладом однієї з функціональних ланок системи регулювання води баку є звичайний важіль (рис.4.2). Рівняння статички йому має вигляд $y=ku$. Його можна зобразити ланкою, функцією якої є посилення (або ослаблення) вхідного сигналу k разів. Коефіцієнт $k=y/u$, що дорівнює відношенню вихідної величини до вхідної називається коефіцієнтом посилення ланки. Коли вхідна та вихідна величини мають різну природу, його називають коефіцієнтом передачі.

Статична характеристика цієї ланки має вигляд відрізка прямої лінії з нахилом $a=\arctg(L_2/L_1)=\arctg(k)$. Ланки з лінійними статичними характеристиками називаються лінійними. Статичні характеристики реальних ланок, зазвичай, нелінійні. Такі ланки називаються нелінійними. Їм характерна залежність коефіцієнта передачі від величини вхідного сигналу: $k=y/u \neq \text{const}$.

Наприклад, статичну характеристику насиченого генератора постійного струму представлено на рис.4.3. Зазвичай нелінійна характеристика не може бути виражена якою-небудь математичною залежністю і її доводиться задавати таблично чи графічно.

Знаючи статичні характеристики окремих ланок, можна побудувати статичну характеристику САК (рис.4.4, 4.5). Якщо всі ланки САК лінійні, САК має лінійну статичну характеристику і називається лінійною. Якщо хоча б одна ланка нелінійна, то САК є нелінійною.

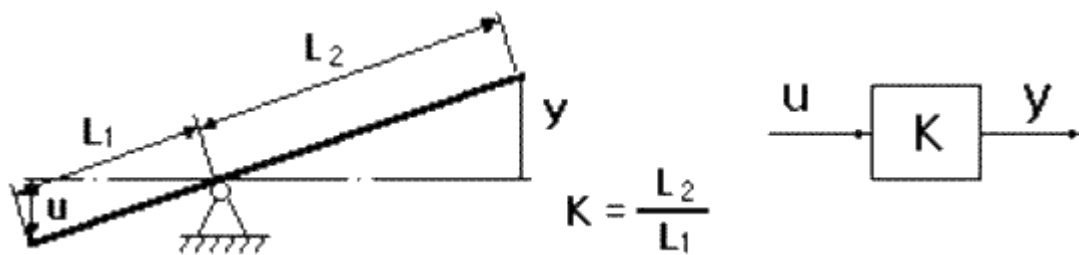


Рисунок 4.2 – Важіль як функціональна ланка системи керування

Ланки, яким можна задати статичну характеристику як жорстку функціональну залежність вихідної величини від вхідної, називаються статичними. Якщо такий зв'язок відсутній і кожному значенню вхідної величини відповідає безліч значень вихідної величини, така ланка називається астатичною. Зображати її статичну характеристику безглуздо. Прикладом астатичної ланки може бути двигун, вхідною величиною якого є напруга U , а вихідною – кут повороту валу, величина якого при $U = \text{const}$ може приймати будь-які значення. Вихідна величина астатичної ланки навіть в усталеному режимі є функцією часу.

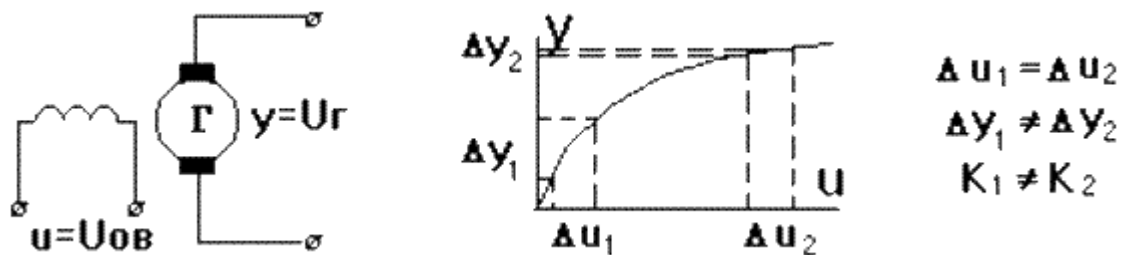


Рисунок 4.3 – Статична характеристика генератора

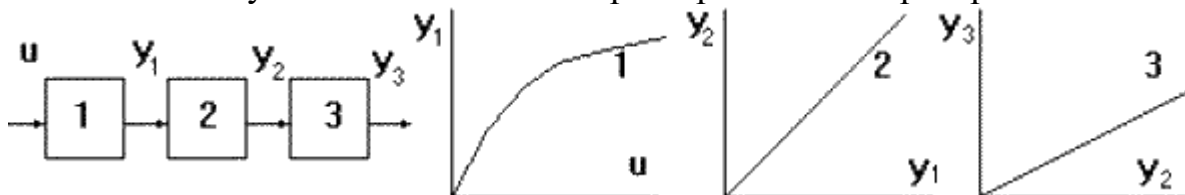


Рисунок 4.4 – Структурна схема САК та статичні характеристики її ланок

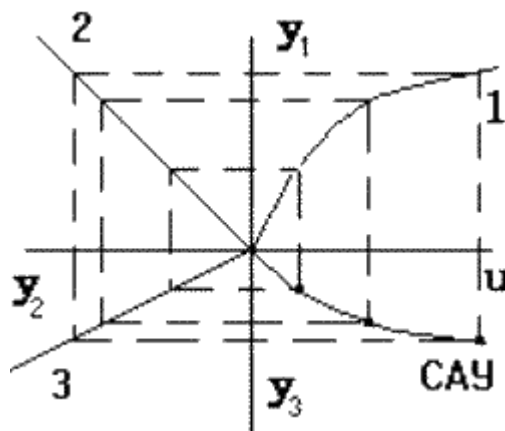


Рисунок 4.5 – Побудова статичної характеристики САК

На практиці частіше зустрічаються нелінійні характеристики, що важко описувати та вивчати. Вихід з цього є застосування методу *лінеаризації*.

Найпростішим видом його є осереднення у 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 через їх малість:

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

4.3. Типові вхідні сигнали

До типових вхідних сигналів, які використовуються для аналізу САК, належать:

- одинична функція (одинична ступінчаста дія);
- одиничний імпульс;
- синусоїдний сигнал.

Перші дві типові дії використовуються при знаходженні часових характеристик САК, остання – для визначення частотних характеристик САК.

Одинична функція (рис. 4.6) – це функція виду

$$L(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < 0, \\ 1, & \text{при } t \geq 0. \end{cases}$$

Іноді цю функцію подають у вигляді

$$L(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < \tau, \\ 1, & \text{при } t \geq \tau, \end{cases}$$

що відрізняється від попереднього випадку затримкою в часі на τ .

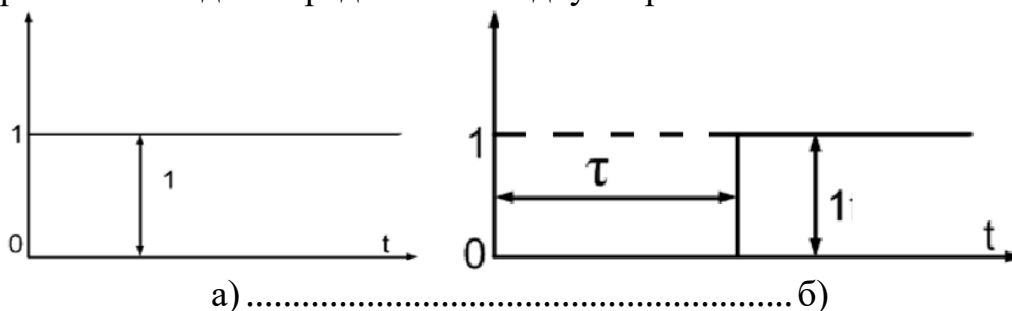


Рисунок 4.6 – Графік одиничної функції: без затримки в часі (а); з затримкою (б)

Фізична інтерпретація одиничної функції – подача в момент часу $t=0$ або $t=\tau$ на вхід одиничного сигналу (напруги).

Одиничний імпульс (рис. 4.7) – це імпульс нескінченно великої амплітуди і нескінченно малої тривалості ($\tau=0$), якому притаманна властивість:

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t \neq 0, \\ \infty, & \text{при } t = 0, \end{cases} \quad \text{причому} \quad \int_0^t \delta(t) dt = 1$$

(рис. 4.8 а).

Розглядають також одиничний імпульс, що відбувається в момент часу τ :

$$\delta(t - \tau) = \begin{cases} 0, & \text{при } t \neq \tau, \\ \infty, & \text{при } t = \tau, \end{cases} \quad \text{причому} \quad \int_0^t \delta(t) dt = 1$$

(рис. 4.8 б).

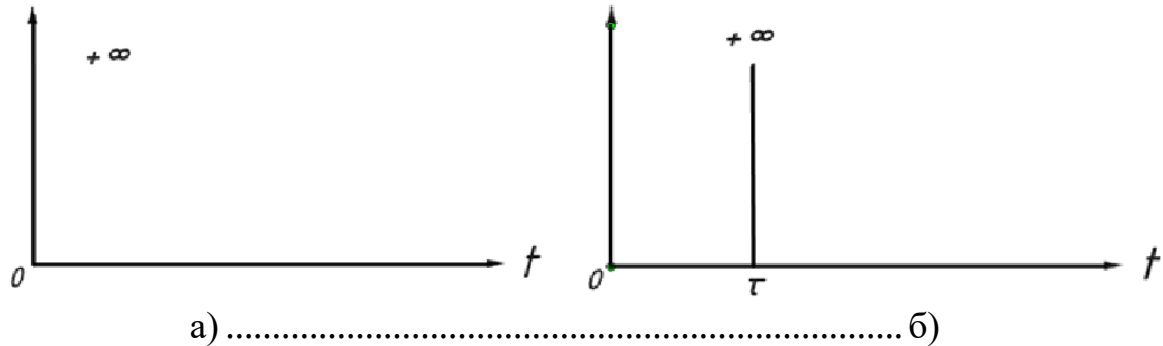


Рисунок 4.7 – Графік функції одиничного імпульсу

Інтерпретацію одиничного імпульсу можна дати так. Розглянемо прямокутний імпульс шириною 2ε і висотою $h = \frac{1}{2\varepsilon}$, так що площа, обмежена імпульсом, дорівнюватиме одиниці. Якщо зменшити вдвічі ширину імпульсу і одночасно збільшити вдвічі висоту, то обмежена імпульсом площа не зміниться і дорівнюватиме одиниці. Повторюючи цей процес, в граничному випадку одержимо прямокутник нульової ширини і нескінченної висоти, площа якого дорівнює одиниці. З фізичної точки зору це короткочасний імпульс фіксованої (одиничної) інтенсивності.

Синусоїдний сигнал – це типовий сигнал, що задається виразом:

$$x(t) = \sin \omega t,$$

або в комплексній формі

$$x(t) = e^{j\omega t}$$

де $\omega = \frac{2\pi}{T}$ – колова частота коливань;

T – період коливань.

Тема 5. Представлення динаміки систем автоматичного керування типовими динамічними ланками

5.1. Ланка з постійним запізненням

У будь-якому пристрої вихідна величина має певне запізнення порівняно з вхідною. В окремих випадках це запізнення є малим і ним можна знехтувати, в інших випадках часовий зсув є істотним і його необхідно враховувати. Якщо пристрій не поглинає енергію, то вхідна й вихідна величини однаково залежать від часу.

Ланка з постійним запізненням описується рівнянням:

$$y(t) = x(t - \tau), \quad (5.1)$$

де τ – час запізнення.

Прикладами ланок з постійним запізненням є довгі трубопроводи, деякі печі й нагрівачі.

Рівняння ланки в операторній формі має вигляд:

$$Y(s) = X(s)e^{-s\tau}, \quad (5.2)$$

її передавальна функція:

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = e^{-s\tau}. \quad (5.3)$$

Перехідна характеристика, яка є графіком реакції ланки $y(t)$ на одиничну функцію, повторює графік ступінчатої функції.

АФЧХ ланки з постійним запізненням отримуємо з (5.3) підстановкою $s \rightarrow j\omega$:

$$W(j\omega) = e^{-j\omega\tau} = \sqrt{\cos^2(\omega\tau) + \sin^2(\omega\tau)} = 1. \quad (5.4)$$

Годограф або амплітудно-фазочастотна характеристика ланки, є колом радіуса 1 з центром у початку координат (рис. 5.1).

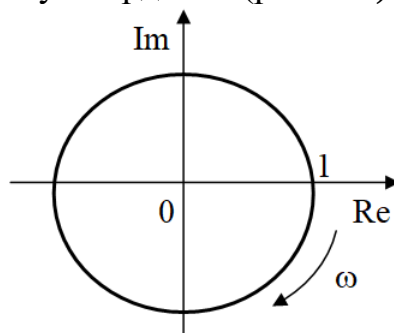


Рисунок 5.1 – Схематичний вигляд АФЧХ ланки з постійним запізненням

Фазочастотна характеристика ланки має вигляд:

$$\varphi = \arctg \frac{\text{Re}}{\text{Im}} = \arctg \left(-\frac{\sin(\omega\tau)}{\cos(\omega\tau)} \right) = -\omega\tau$$

5.2. Диференціююча ланка

Ланка називається **диференціюючою**, якщо її функціонування описується рівнянням

$$y(t) = T \frac{dx}{dt}, \quad (5.5)$$

тобто вихідна величина такої ланки пропорційна похідній від вхідної величини.

В операторній формі рівняння диференціюючої ланки має вигляд:

$$Y(s) = TsX(s), \quad (5.6)$$

а передавальна функція:

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = Ts. \quad (5.7)$$

Перехідна функція диференціювальної ланки

$$h(t) = T\delta(t). \quad (5.8)$$

Рівняння АФЧХ диференціальної ланки отримаємо при підстановці $s \rightarrow j\omega$ у її передавальну функцію:

$$W(j\omega) = jT\omega, \quad (5.9)$$

тобто амплітудно-фазова характеристика ланки збігається з додатною уявною піввіссю (рис. 5.2).

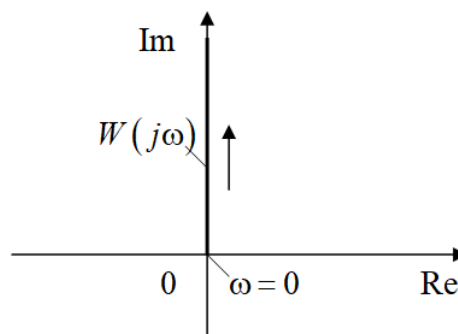


Рисунок 5.2 – Амплітудно-фазочастотна характеристика диференціювальної ланки

Згідно з (5.9), амплітудна і фазова частотні характеристики диференціювальної ланки:

$$W(\omega) = T\omega$$
$$\varphi(\omega) = \arctg\left(\frac{T\omega}{0}\right) = +\frac{\pi}{2}.$$

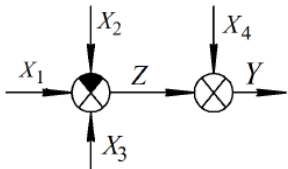
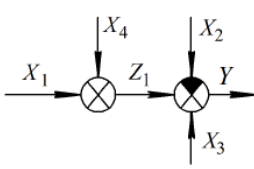
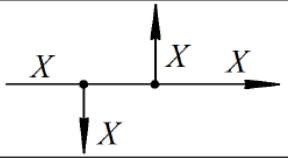
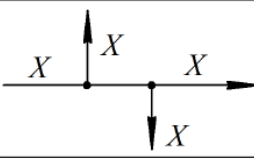
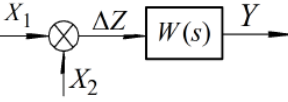
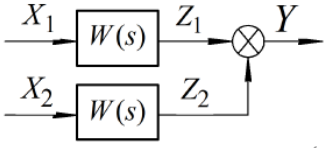
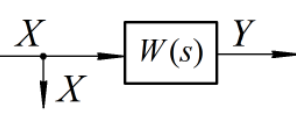
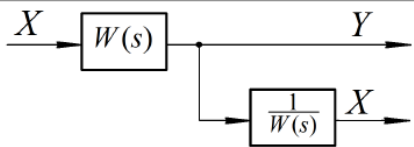
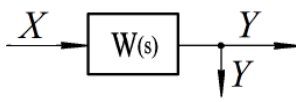
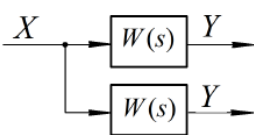
5.2. Перетворення структурних схем

У ряді випадків вихідна структура САК може бути такою, що застосування основних правил структурних перетворень для послідовного, паралельного та зустрічно-паралельного з'єднань виявляється недостатньо для її спрощення. Такими системами є багатоконтурні системи, що містять перехресні зв'язки. Для перетворення таких схем використовуються ряд

додаткових правил, які ґрунтуються на принципі еквівалентності, згідно з яким всі вхідні та вихідні сигнали кожної ділянки схеми, що перетворюється, повинні залишатися незмінними.

Найпоширеніші з цих правил наведені в табл. 5.1, де всі змінні Z позначають сигнали, які з'явилися або зникли в результаті перетворень.

Таблиця 5.1 – Правила перетворення структурних схем САК

Операція	Вихідна схема	Перетворена схема
Перестановка суматорів	 $Y = X_1 - X_2 + X_3 + X_4$	 $Y = X_1 + X_4 - X_2 + X_3$
Перестановка вузлів розгалуження сигналів		
Переміщення суматора через ланку вперед	 $Y = W(s)(X_1 + X_2)$	 $Y = W(s)X_1 + W(s)X_2(s) = W(s)(X_1 + X_2)$
Переміщення вузла розгалуження через ланку вперед	 $Y = W(s)X$ $X = X$	 $X = X$ $Y = W(s)X$
Переміщення вузла розгалуження через ланку назад	 $Y = W(s)X$	 $Y = W(s)X$

Тема 6. Стійкість систем автоматичного керування та методи її оцінювання

6.1. Загальні умови стійкості систем автоматичного регулювання

Усі реальні системи в техніці й у природі, як правило, є нелінійними. Завжди існує багато факторів, що відхиляють реальні характеристики від лінійних у більшій чи меншій степені. Багато систем можна вважати близькими до лінійних і з необхідної для практики точністю проектувати як лінійні. Для цього здійснюється лінеаризація характеристик і рівнянь усіх реальних ланок системи. Така система керування може бути описана рівнянням виду:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (6.1)$$

де a_n, b_m – коефіцієнти, що залежать від параметрів САК.

З математичної точки зору рівняння (6.1) – це неоднорідне диференціальне рівняння. Його загальний розв’язок представляється у вигляді суми двох доданків:

$$y(t) = y_{\text{св}}(t) + y_{\text{вим}}(t),$$

де $y_{\text{св}}(t)$ є загальним розв’язком однорідного рівняння (вільний рух)

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = 0, \quad (6.2)$$

$y_{\text{вим}}(t)$ – частинний розв’язок неоднорідного рівняння (4.1).

Для стійкості системи необхідне загасання перехідного процесу з часом, тобто наступна властивість власного (вільного) руху системи:

$$y_{\text{св}}(t) \rightarrow 0 \text{ при } t \rightarrow \infty. \quad (6.3)$$

При цьому вихідна величина системи буде прагнути до вимушеної складової, обумовленої зовнішнім впливом і правою частиною рівняння (6.1).

Як наслідок, властивості системи в перехідному режимі визначаються властивостями розв’язків однорідного диференціального рівняння (6.2). Відповідне йому операторне рівняння

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

зводиться до алгебраїчного рівняння, яке називають характеристичним;

$$a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = 0. \quad (6.4)$$

Таке рівняння в комплексних числах матиме рівно n коренів, де n – порядок рівняння. Якщо $s_1, s_2, \dots, s_n$ – ці корені, то розв’язок диференціального рівняння (6.1) записується у вигляді суми функцій

$$y_{\text{св}}(t) = y_1(t) + y_2(t) + \dots + y_p(t), \quad (6.5)$$

де $y_k(t) = C_k e^{s_k t}$,

C_k – постійні інтегрування, які залежать від початкових умов,

s_k – корені характеристичного рівняння.

Корені характеристичного рівняння можуть бути дійсними $s_i = \alpha_i \in R$ або комплексними спряженими

$$s_k = \alpha_k + j\beta_k, s_{k+1} = \alpha_k - j\beta_k,$$

де α_k, β_k – дійсні числа,
 j – уявна одиниця.

Дійсним кореням в сумі (6.5) відповідають доданки виду

$$y_i(t) = C_i e^{\alpha_i t}, \quad (6.6)$$

парі комплексних спряжених - доданки

$$y_k(t) = C_k e^{\alpha_k t} \sin \beta_k t. \quad (6.7)$$

Умова стійкості системи (6.3) буде виконуватися лише тоді, коли всі доданки у (6.4) матимуть ту ж властивість, тобто якщо

$$y_j(t) \rightarrow 0 \text{ при } t \rightarrow \infty.$$

Аналіз виразів (6.6) і (6.7) показує, що це буде справджуватися за умови, що $\alpha_i < 0$ і $\alpha_k < 0$ (рис.6.1 а, б). Справді, при цьому експоненти прямують до нуля при $t \rightarrow \infty$, а множник $\sin \beta_k t$ в силу обмеженості функції синус не може змінити цей хід (рис.6.1 б). **Необхідна умова стійкості** полягає в тому, що в стійкій системі керування дійсні корені характеристичного рівняння та дійсні частини комплексних спряжених коренів мають бути від'ємними.

Якщо ж хоча б один дійсний корінь характеристичного рівняння буде додатнім чи якщо хоча б одна пара комплексних коренів буде мати додатну дійсну частину, то перехідний процес буде розбіжним (рис. 6.1 в,г).

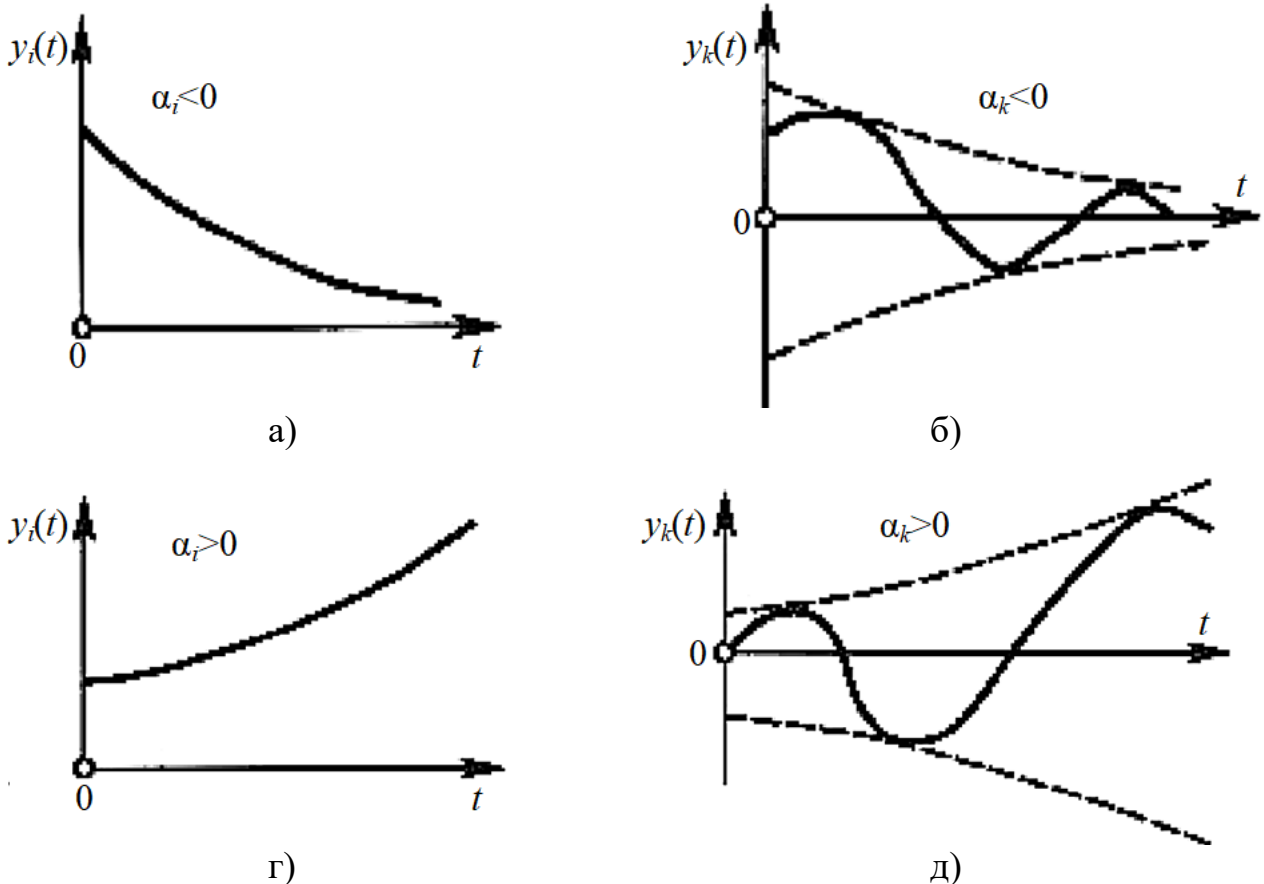


Рисунок 6.1 – Перехідні процеси при різних знаках коренів характеристичного рівняння

Якщо в характеристичному рівнянні системи є хоча б один нульовий корінь $s_i=0$ чи хоча б одна пара чисто уявних коренів $s_k=\pm\beta j$, а всі інші корені мають від'ємні дійсні частини, то система знаходиться на межі стійкості.

Можна показати, що необхідною умовою стійкості є однакові знаки всіх коефіцієнтів характеристичного полінома (характеристичного рівняння). Справді, характеристичний поліном системи можна записати у вигляді:

$$A(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = a_n (s - s_1)(s - s_2) \dots (s - s_n).$$

Якщо система стійка, то всі корені мають від'ємну дійсну частину. Це значить, що дійсні корені можна записати у вигляді:

$$s_i = -|\alpha_i|,$$

а пари комплексних спряжених – у вигляді

$$s_{k,k+1} = -|\alpha_k| \pm \beta_k j.$$

Тоді вираз для характеристичного полінома можна записати, згрупувавши спочатку дійсні, а потім комплексні спряжені корені:

$$A(s) = a_n (s + |\alpha_1|)(s + |\alpha_2|) \dots (s + |\alpha_i|) \dots (s + |\alpha_k| + \beta_k j)(s + |\alpha_k| - \beta_k j) \dots$$

Добуток множників, що містять дійсні корені, очевидно, дадуть поліном з додатними коефіцієнтами. Перемножаючи попарно множники з комплексними спряженими коренями, одержимо:

$$(s + |\alpha_k| + \beta_k j)(s + |\alpha_k| - \beta_k j) = s^2 + |\alpha_k| s - \beta_k s j + |\alpha_k| s + |\alpha_k|^2 - |\alpha_k| \beta_k j + \beta_k s j + |\alpha_k| \beta_k j - \beta_k^2 j^2 = s^2 + 2|\alpha_k| s + |\alpha_k|^2 + \beta_k^2,$$

тобто добуток такої пари множників дає квадратний тричлен з додатними коефіцієнтами. Тоді добуток всіх множників дасть поліном степеня n з додатними коефіцієнтами. Знаки коефіцієнтів всього характеристичного полінома будуть при цьому визначатися знаком старшого коефіцієнта a_n і співпадатимуть з ним.

Отже, необхідною (але не достатньою!) умовою стійкості САК є однаковий знак всіх коефіцієнтів характеристичного полінома (рівняння). Якщо коефіцієнти мають різні знаки (є і додатні, і від'ємні), система однозначно є нестійкою.

6.2. Алгебраїчні критерії стійкості. Критерій стійкості Гурвіца

Алгебраїчні критерії дозволяють робити висновок про стійкість системи за коефіцієнтами характеристичного рівняння (6.4).

У 1895 р. німецьким математиком А. Гурвіцем був розроблений алгебраїчний критерій стійкості у формі визначників, що складаються з коефіцієнтів характеристичного рівняння системи.

З коефіцієнтів характеристичного рівняння будують спочатку головний визначник Гурвіца за наступним правилом: по головній діагоналі визначника зліва направо записують усі коефіцієнти характеристичного рівняння від a_{n-1} до a_0 у порядку спадання індексів. Стовпці вгору від головної діагоналі доповнюють коефіцієнтами характеристичного рівняння з послідовно спадаючими індексами, а стовпці вниз — коефіцієнтами з послідовно

зростаючими індексами. На місце відсутніх коефіцієнтів (з індексами більше n чи менше 1) проставляють нулі.

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & a_{n-7} & \dots & 0 \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & a_{n-6} & \dots & 0 \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & \dots & 0 \\ 0 & a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & a_n & a_{n-2} & \dots & 0 \\ & & \dots & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & a_0 \end{vmatrix}$$

Відкреслюючи в головному визначнику Гурвіца, як показано, діагональні мінори, одержуємо визначники Гурвіца нижчого порядку:

$$\Delta_1 = a_{n-1}, \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} \\ a_n & a_{n-2} \end{vmatrix}, \Delta_3 = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} \end{vmatrix}, \dots$$

Критерій стійкості Гурвіца: для того, щоб система автоматичного керування була стійкою, необхідно і достатньо, щоб усі визначники Гурвіца мали знаки, однакові зі знаком старшого коефіцієнта характеристичного рівняння, тобто при $a_n > 0$ були додатними.

Зокрема, для характеристичних рівнянь першого, другого і третього порядків можна одержати такі умови стійкості:

1) рівняння першого порядку ($n=1$):

$$a_1 s + a_0 = 0 \quad (a_1 > 0, a_0 > 0).$$

Визначник Гурвіца складається з одного елемента

$$\Delta_1 = |a_0| = a_0 > 0.$$

2) для рівняння другого порядку ($n=2$)

$$a_2 s^2 + a_1 s + a_0 = 0 \quad (a_2 > 0, a_1 > 0, a_0 > 0)$$

визначник Гурвіца

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

Для систем першого і другого порядку додатність коефіцієнтів характеристичного рівняння є необхідною і достатньою умовою стійкості.

3) для рівняння третього порядку ($n=3$)

$$a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 = 0 \quad (a_3 > 0, a_2 > 0, a_1 > 0, a_0 > 0).$$

Визначник Гурвіца

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_2 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & a_2 & a_0 \end{vmatrix} = (-1)^{3+3} \cdot a_0 \cdot \begin{vmatrix} a_2 & a_0 \\ a_3 & a_1 \end{vmatrix} = a_0 (a_2 a_1 - a_3 a_0)$$

Звідси слідує, що для стійкості системи повинна також виконуватися додаткова умова:

$$a_2 a_1 - a_3 a_0 > 0, \quad a_2 a_1 > a_3 a_0.$$

Одержуємо **критерій Вишнєградського**: для стійкості систем 3-го порядку необхідно і достатньо, щоб добуток середніх коефіцієнтів був більшим за добуток крайніх.

Для рівнянь третього, четвертого і вищих порядків, окрім додатності коефіцієнтів, необхідне виконання додаткових нерівностей. При збільшенні n число цих додаткових нерівностей зростає, а процес розкриття визначників стає громіздким. Тому критерій стійкості Гурвіца звичайно застосовують при невеликих значеннях n ($n \leq 4$).

В останньому стовпці головного визначника Гурвіца відмінний від нуля тільки один коефіцієнт a_0 , тому

$$\Delta_n = (-1)^{n+n} \cdot a_0 \cdot \Delta_{n-1} = a_0 \cdot \Delta_{n-1}.$$

Очевидно, що при для перевірки стійкості системи досить знайти тільки визначники Гурвіца від Δ_1 до Δ_{n-1} . Якщо усі визначники Гурвіца нижчого порядку додатні, то система знаходиться на границі стійкості, коли головний визначник дорівнює нулю:

$$\Delta_n = a_0 \cdot \Delta_{n-1} = 0.$$

Остання рівність можлива в двох випадках: $a_0=0$ чи $\Delta_{n-1}=0$. У першому випадку система знаходиться на аперіодичній межі стійкості (один з коренів характеристичного рівняння дорівнює нулю); у другому випадку - на коливальній межі (є два чисто уявні комплексно-спряжені корені).

Використовуючи критерій Гурвіца, можна при заданих параметрах системи прийняти за невідомий який-небудь один параметр (наприклад, коефіцієнт підсилення, сталу часу тощо) і визначити його граничні (критичні) значення, при яких система буде знаходитися на межі стійкості.

В математиці доведено, що в тому випадку, коли всі коефіцієнти характеристичного рівняння додатні, з того факту, що додатні усі визначники $\Delta_1, \Delta_3, \Delta_5, \dots$ з непарними індексами, випливає і додатність визначників Гурвіца $\Delta_2, \Delta_4, \Delta_6, \dots$ з парними індексами, і навпаки.

Тому в тих випадках, коли виконані необхідні умови стійкості, тобто $a_0 > 0$; $a_1 > 0$; ..., $a_n > 0$, необхідні і достатні умови стійкості зводяться до того, щоб серед визначників Гурвіца $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ були додатні усі визначники з парними (чи усі визначники, з непарними) індексами.

Таке формулювання критерію стійкості, назване критерієм стійкості Льєнара-Шипара, потребує обчислення меншого числа визначників порівняно з критерієм Гурвіца, а тому більш зручне при дослідженні стійкості систем автоматичного керування високого порядку.

6.3. Частотні критерії стійкості. Критерій стійкості Найквіста

Критерій стійкості Найквіста дозволяє робити висновки щодо стійкості замкнених систем по вигляду АФЧХ розімкненої системи.

Будемо вважати, що передавальна функція розімкненої системи має вигляд:

$$W_{роз}(s) = \frac{N(s)}{M(s)},$$

де $N(s)$, $M(s)$ – відповідно чисельник та знаменник функції передачі. При цьому обов'язково порядок чисельника m не перевищує порядку знаменника n .

Передавальна функція замкненої системи

$$W_z(s) = \frac{W_{роз}(s)}{1 + W_{роз}(s)} = \frac{\frac{N(s)}{M(s)}}{1 + \frac{N(s)}{M(s)}} = \frac{\frac{N(s)}{M(s)}}{\frac{M(s) + N(s)}{M(s)}} = \frac{N(s)}{M(s) + N(s)} = \frac{N(s)}{A(s)}$$

де $M(s)$ – характеристичний поліном розімкненої системи,

$A(s)$ – характеристичний поліном замкненої системи.

При підстановці $s=j\omega$ в $W_{роз}(s)$ отримаємо комплексний коефіцієнт передачі

$$W_{роз}(j\omega) = \frac{N(j\omega)}{M(j\omega)} = U_p(\omega) + jV_p(\omega),$$

де $U_p(\omega)$, $V_p(\omega)$ – дійсна та уявна частини комплексного коефіцієнту передачі розімкнутої системи.

Оскільки $m \leq n$, то при частоті $\omega \rightarrow \infty$ модуль $W_{роз}(j\omega)$ буде наближатися до нуля, тобто АФЧХ розімкненої системи має закінчуватися в початку системи координат.

Розглянемо стійку статичну розімкнену систему, тобто таку, для якої корені характеристичного рівняння знаходяться у лівій півплощині.

Знаменник функції передачі замкненої системи керування $F(s)$:

$$F(s) = 1 + W(s) = 1 + \frac{N(s)}{M(s)} = \frac{M(s) + N(s)}{M(s)} = \frac{A(s)}{M(s)}.$$

Зробимо заміну $s=j\omega$:

$$F(j\omega) = \frac{A(j\omega)}{M(j\omega)}.$$

Якщо всі корені характеристичного рівняння замкненої системи n -го порядку $A(s)=0$ знаходяться у лівій півплощині (система стійка), то, у відповідності до критерію стійкості Михайлова, загальний приріст аргументу характеристичного полінома замкненої системи $\varphi_A(\omega)$ повинен складати $n \cdot \pi/2$, тобто:

$$\varphi_A(\omega) = n \cdot \pi/2.$$

Оскільки розглядаються стійкі у розімкненому стані системи, то загальний приріст аргументу характеристичного полінома розімкненої системи $\varphi_M(\omega)$ теж повинен складати $n \cdot \pi/2$, тобто:

$$\varphi_M(\omega) = n \cdot \pi / 2.$$

Таким чином, загальний приріст аргументу комплексного полінома $F(j\omega)$:

$$\Delta\varphi_F(\omega) = n \cdot \pi / 2 - n \cdot \pi / 2 = 0$$

(оскільки при діленні комплексних виразів в показниковій формі фазові множники віднімаються).

Це означає, що годограф $F(j\omega)$ не повинен охоплювати початок координат.

АФЧХ $W_{роз}(j\omega)$ відрізняється від полінома $F(j\omega)$ на 1. Тому можна скористатися годографом амплітудно-фазової частотної характеристики розімкненої системи $W_{роз}(j\omega)$.

Розглянемо відображення на комплексній площині годографів $F(j\omega)$ і $W(j\omega)$ (рис. 6.2). Як видно з рисунка, обидві криві ідентичні, якщо не враховувати зсув однієї з них по відношенню до початку координат на одиницю.

З рисунка випливає, що для того, щоб стійка у розімкненому стані система була стійкою у замкненому стані, необхідно і достатньо аби АФЧХ розімкненої системи $W_{роз}(j\omega)$ не охоплювала критичну точку C з координатами $[-1; j0]$.

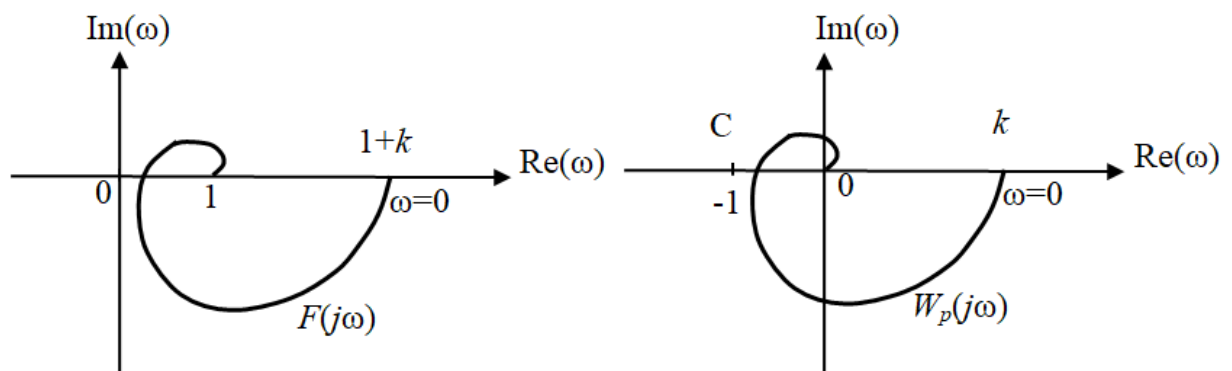


Рисунок 6.2 – Годограф для замкненої і розімкненої систем

Якщо $W(j\omega)$ проходить через точку C , замкнена система буде знаходитися на межі стійкості, це відповідає встановленню незатухаючих коливань.

6.4. Логарифмічний критерій стійкості

У відповідності до критерію стійкості Найквіста, в стійких замкнених системах при значенні аргументу АФЧХ розімкненої системи $\varphi(\omega) = -\pi$, значення модуля $W(j\omega)$ повинне бути менше одиниці, тобто $A(\omega) < 1$, а логарифмічна амплітудно-частотна характеристика розімкненої системи (ЛАЧХ) $L(\omega) = 20 \lg A(\omega) < 0$.

Якщо побудувати ЛАЧХ і ЛФЧХ для розімкненої системи, то неважко встановити їх взаємозв'язок, який забезпечує стійкість системи автоматичного керування у замкненому стані.

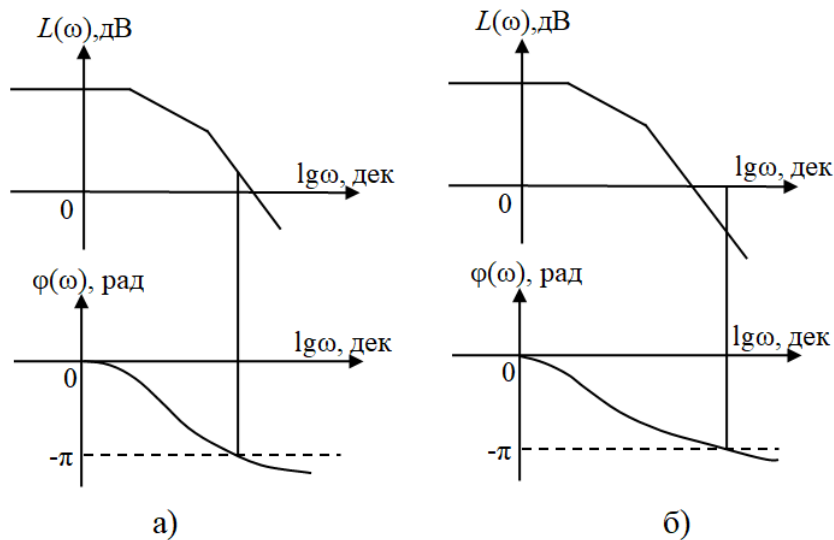


Рисунок 6.3 – Визначення стійкості системи за її ЛАЧХ

Будемо розглядати системи, які є стійкими у розімкненому стані.

На рисунку 6.3, а на частоті, при якій значення ЛФЧХ $\varphi(\omega)$ стає рівним $-\pi$, значення ЛАЧХ $L(\omega) > 0$. Це означає, що АФЧХ розімкненої системи перетинає дійсну вісь в інтервалі значень за межами відрізка $[-1; 0j]$, тобто охоплює критичну точку С, тому замкнена система буде нестійкою.

На рисунку 6.3, б на частоті, при якій ЛФЧХ $\varphi(\omega)$ відповідає тій же умові, ЛАЧХ $L(\omega) < 0$, тому АФЧХ розімкненої системи перетинає дійсну вісь в інтервалі значень від -1 до 0, що відповідає стійкості замкненої системи керування.

Формулювання логарифмічного критерію стійкості: замкнена система керування буде абсолютно стійкою, якщо при частоті, при якій ЛФЧХ перетинає горизонтальну лінію $-\pi$, ЛАЧХ має від'ємне значення.

Тема 7. Якість систем автоматичного керування у перехідному та усталеному режимах

7.1. Показники якості систем автоматичного керування

Якість процесу керування – це комплекс вимог, що визначають поведінку системи керування в перехідному і усталеному режимах при відпрацюванні заданих керуючих дій.

Показники якості - необхідні динамічні характеристики системи.

Основна **задача оцінки якості** полягає у встановленні аналітичних залежностей, які пов'язують структуру і параметри САК з числовими оцінками (показниками якості) введеними для характеристики перехідних і усталених процесів.

Показниками якості САК є

а) для перехідного режиму:

- час регулювання (t_p)
- час усталення (t_y)
- перерегулювання (σ);
- число коливань (N);

б) для усталеного режиму:

- усталена похибка системи $Q_{уст}$ (t).

Оскільки час регулювання характеризує швидкість системи, то намагаються там, де це необхідно, звести його до мінімуму. Це значить, що система повинна відпрацьовувати задаючу дію з більшою швидкістю, що в підсумку приводить до більшого перерегулювання. Крім того, оскільки перехідний процес може бути коливальним, то будуть мати місце великі прискорення регульованої величини, що може викликати неприпустимо великі динамічні навантаження на елементи системи. Таким чином, як відсутність, так і досить велике перерегулювання небажані. Тому в якості оптимального припускають перерегулювання в межах 20-30%. При цьому кількість напівколивань перехідної функції дорівнює 2-3.

Чисельні значення часу регулювання та перерегулювання часто задають в якості вихідних даних для синтезу коректуючих пристроїв, оскільки вірним підбором та налагодженням останніх забезпечується зменшення небажаних коливань регульованої величини у перехідних процесах.

Для деяких систем перерегулювання взагалі неприпустиме. Необхідно також мати на увазі те, що намагання зменшити час регулювання приводить до збільшення потужності виконавчого пристрою.

Зменшення перерахованих показників якості означає підвищення якості системи. Умови їх зменшення суперечливі. Наприклад, збільшенням коефіцієнта підсилення системи k_p або сталої часу T можна зменшити t_y , але при цьому зростають $\sigma\%$, N , тобто зростає t_p . Тому задача досягнення потрібних показників якості є компромісною, і зазвичай досягають наступних їх значень:

$$t_p = (3 \dots 5) T_{\max}$$

$$t_y = (1 \dots 2) T_{\max}$$

$$\sigma = 30 \dots 40\%$$

$$N = 2 \dots 3$$

де $T_{\max}$ - максимальна стала часу САК.

При найбільш загальній оцінці якості, насамперед, звертають увагу на форму перехідного процесу. Розрізняють три типові перехідні процеси (рис. 7.1): коливальний (1), аперіодичний з перерегулюванням (2), монотонний аперіодичний (3).

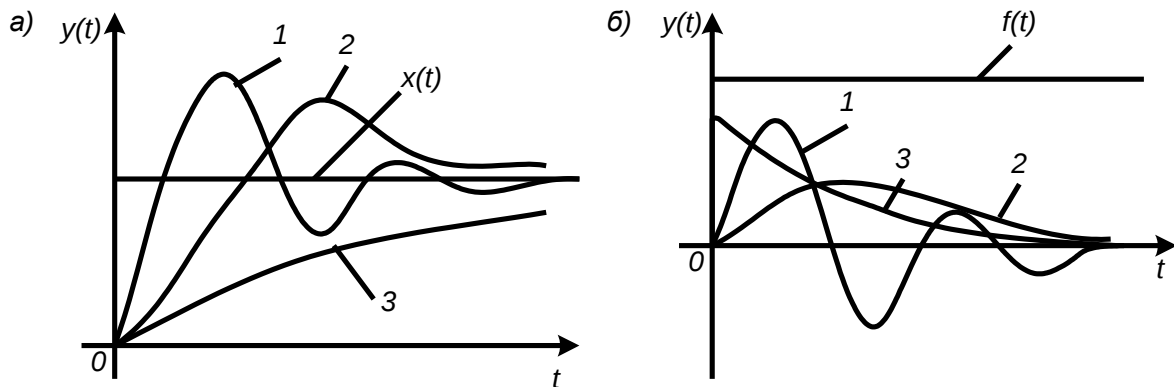


Рисунок 7.1 – Типові перехідні процеси (а – за задаючою дією; б – за збуренням): 1 – коливальний, 2- аперіодичний, 3 - монотонний

Кожний з типових перехідних процесів має свої переваги й недоліки, і перевагу тій або іншій формі процесу надають із урахуванням особливостей керованого об'єкта. Оптимальним є аперіодичний процес, який забезпечує швидкий перехід на заданий рівень при незначних коливаннях.

Додатково розглядають і інші показники якості.

Ступінь загасання

$$\psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1} = 1 - \frac{A_3}{A_1}.$$

де A_1 й A_3 - сусідні максимальні відхилення одного знаку.

Інтенсивність загасання коливань у системі вважається задовільною, якщо $\psi = 0,75 \dots 0,95$.

- Час наростання t_n ;
- Час досягнення першого максимуму t_m ;
- Період загасаючих коливань T_3 .

Ці показники разом з t_n характеризують швидкодію системи регулювання.

Три головних показники якості – перерегулювання σ , перше максимальне відхилення u_m і тривалість перехідного процесу t_n – тісно зв'язані між собою. Вони залежать від всіх параметрів системи, але найбільше сильно – від передатного коефіцієнта k розімкнутої системи. Причому, зі збільшенням цього коефіцієнта максимальне відхилення по каналі збурювання завжди зменшується (рис.7.2, а), максимальне відхилення за каналом впливу, що задає, завжди збільшується (рис.7.2, б) а

перерегулювання й тривалість перехідного процесу, як правило, збільшуються (рис.7.2). Відшукування оптимального компромісу між цими двома суперечливими тенденціями є однієї з основних завдань *синтезу САК*.

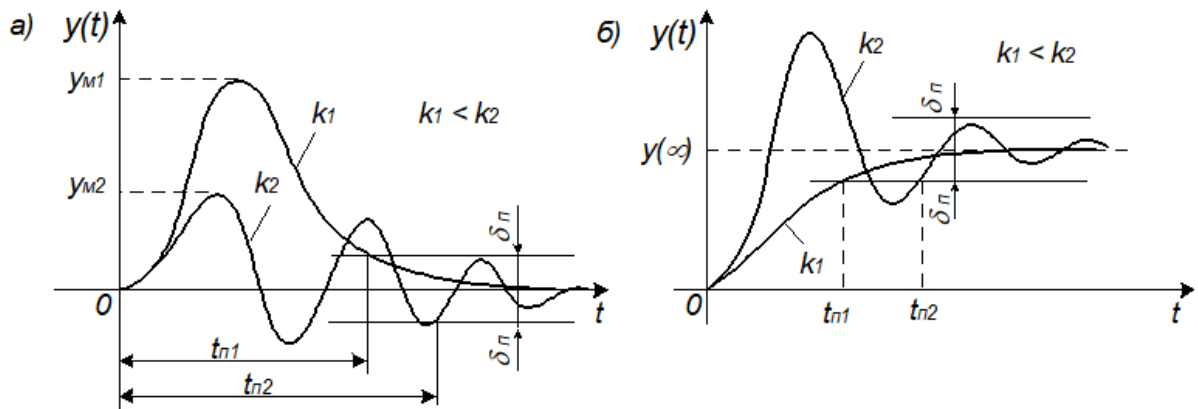


Рисунок 7.2 – Вплив передатного коефіцієнта розімкнутої системи на показники перехідного процесу
а – за впливом, що збудує; б - за впливом, що задає

7.2. Застосування кореневих методів для оцінки показників якості

Кореневими методами вирішують такі задачі:

- 1) за заданими параметрами системи, які входять в характеристичне рівняння, визначити показники якості (задача аналізу);
- 2) за заданими показниками якості знайти допустимі або бажані значення параметрів системи (задача синтезу).

Друга задача може бути розв'язана методом кореневого годографа (якщо неважко визначити корені характеристичного рівняння), методом зміщеного рівняння або методом D-розбиття.

7.2.1. Метод кореневого годографа

Сукупність траєкторій, які описують на комплексній площині коренями характеристичного рівняння при зміні одного з параметрів від 0 до ∞ , називається **кореневим годографом** (рис. 7.3).

Нехай $W_p(s) = k \frac{N(s)}{D(s)}$ - передавальна функція розімкнутої системи, тоді передавальна функція замкненої системи

$$W_z(s) = \frac{W_p(s)}{1 + W_p(s)} = \frac{k \frac{N(s)}{D(s)}}{1 + k \frac{N(s)}{D(s)}} = \frac{kN(s)}{D(s) + kN(s)}.$$

Характеристичний поліном замкненої системи

$$A(s) = D(s) + kN(s)$$

Точки, для яких $N(s) = 0$ (корені чисельника) - нулі розімкнутої системи, для яких $D(s) = 0$ (нулі знаменника) - полюси системи. Оскільки

зазвичай оцінюють замкнуту систему, в її характеристичне рівняння потрапляють і нулі, і полюси розімкненої системи. Найчастіше в якості змінного параметра виступає коефіцієнт підсилення регулятора k .

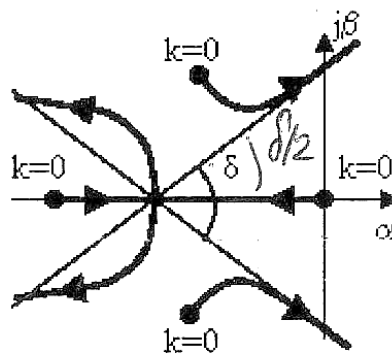


Рисунок 7.3 – Кореневий годограф

Властивості кореневого годографа

1. Кореневий годограф є симетричним відносно дійсної осі
2. Кореневий годограф складається з n гілок (n – порядок характеристичного рівняння)
3. Вітки годографа виходять із n нулів рівняння $D(s)=0$ при $k=0$ (тобто коли коефіцієнт підсилення дорівнює нулю).
4. З них m гілок закінчуються в m нулях рівняння $N(s)=0$, а $n-m$ гілок прямують у нескінченність при $k \rightarrow \infty$.

Метод кореневого годографа використовується для проектування систем регулювання, він дає можливість оцінити межі зміни досліджуваного параметра, які забезпечують задані вимоги за стійкістю і якістю регулювання.

7.2.2. Метод D-розбиття

Нехай система описується характеристичним рівнянням:

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

Розташування всіх n коренів характеристичного рівняння на комплексній площині $\sigma - j\beta$ залежить від значень коефіцієнтів $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$. У загальному випадку в просторі варіюваних параметрів (коефіцієнтів) існують такі значення коефіцієнтів, при якому l коренів розташовані справа, а $(n - l)$ коренів - зліва від уявної осі $j\beta$. Сукупність всіх таких значень утворює в просторі коефіцієнтів область, яку можна позначити $D(n-l; l)$. Існують області з іншим розподілом коренів: $D(n-l-1; l+1)$, $D(n-l-2; l+2)$.

Область $D(n; 0)$ є областю стійкості. Процес побудови в просторі параметрів (або коефіцієнтів) областей з різним розподілом коренів називається **D-розбиттям**. Лінії, що розмежовують ці області називаються **кривими D-розбиття** (рис. 7.4).

Якщо замість заміни $s = j\omega$ в характеристичному рівнянні зробити підстановку $s = -\eta + j\omega$ або $s = -(|\omega|/\mu) + j\omega$, де η і μ - задані числа, то,

виконуючи далі всі звичайні операції методу D-розбиття, можна одержати області заданого ступеня стійкості й коливальності в просторі коефіцієнтів, що варіюються, і параметрів системи.

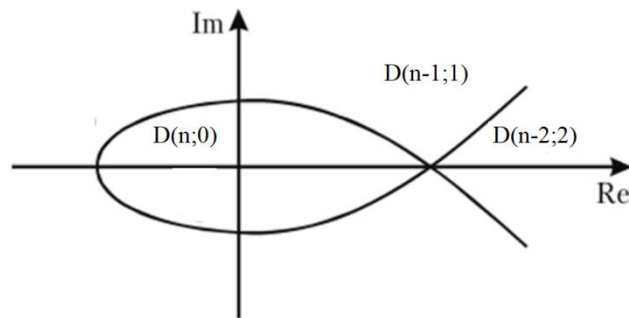


Рисунок 7.4 – D-розбиття комплексної площини

7.2.3. Метод зміщеного рівняння

При проектуванні системи за заданим часом регулювання знаходять η . Якщо в площині коренів провести вертикальну лінію через η і вважати, що це нова уявна вісь, решта коренів будуть знаходитися зліва від неї, а система буде на межі стійкості. Тоді нове характеристичне рівняння, корені якого зсунуті на η

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

повинне задовольняти граничним умовам стійкості. Звідси знаходять потрібні значення параметрів.

Приклад. Знайти діапазон значень k , які забезпечують $t_{рег} \leq 5$ с. Характеристичне рівняння системи

$$D(s) = s^3 + 3s^2 + 4s + k = 0.$$

За заданим $t_{рег}$ знаходимо:

$$t_{рег} \approx \frac{3}{\eta}, \eta \approx \frac{3}{t_{рег}} = \frac{3}{5} = 0,6,$$

$$\eta \approx \frac{3}{t_{рег}} = \frac{3}{5} = 0,6.$$

Записуємо зміщене рівняння:

$$D_1(s) = (s - 0,6)^3 + 3(s - 0,6)^2 + 4(s - 0,6) + k = 0,$$

$$s^3 - 1,8s^2 + 1,08s - 0,216 + 3s^2 - 3,6s + 1,08 + 4s - 2,4 + k = 0,$$

$$s^3 + 1,2s^2 + 1,48s + k - 1,536 = 0.$$

Складаємо визначники Гурвіца

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 1,2 & k - 1,536 & 0 \\ 1 & 1,48 & 0 \\ 0 & 1,2 & k - 1,536 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_1 = 1,2 > 0$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 1,2 & k-1,536 \\ 1 & 1,48 \end{vmatrix} = 1,2 \cdot 1,48 - 1 \cdot (k-1,536) = 3,312 - k$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 1,2 & k-1,536 & 0 \\ 1 & 1,48 & 0 \\ 0 & 1,2 & k-1,536 \end{vmatrix} = \Delta_2 \cdot (k-1,536)$$

Коливальна межа стійкості:

$$3,312 - k = 0,$$

$$k = 3,312.$$

Аперіодична межа стійкості:

$$a_0 = k - 1,536 = 0,$$

$$k = 1,536.$$

Тоді діапазон допустимих значень k :

$$1,536 < k < 3,312.$$

7.3. Частотний метод побудови перехідного процесу

Побудова кривої перехідного процесу за відомими частотними характеристиками системи має велике практичне значення, тому що не пов'язана з громіздкими обчисленнями, особливо при застосуванні логарифмічних частотних характеристик. Крім того, частотні характеристики можна отримати експериментально.

Розглянемо найбільш поширений метод, який відноситься до наближеного графоаналітичного методу.

Суть даного методу полягає в тому, що графік $P(\omega)$ (дійсна частина частотної характеристики) розбивають на типові трапеції. Потім для трапеції на основі заздалегідь складених таблиць h -функцій, розрахованих за допомогою формули

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{P(\omega) \sin \omega t}{\omega} d\omega$$

будують графік перехідної функції. Шукану перехідну функцію знаходять шляхом алгебраїчного додавання ординат окремих складових.

Таблиці h -функцій складені для одиничної трапеції, яка характеризується коефіцієнтом нахилу $\chi = \omega_d / \omega_0$ (рис. 7.5). Така таблиця дозволяє для заданого значення χ побудувати графік перехідної характеристики $h(t)$ в функції відносного часу $\tau = \omega_0 t$, де t - поточний час перехідного процесу. Якщо висота трапеції не дорівнює одиниці, то графік $h(\tau)$ відповідно змінить свій масштаб по осі ординат.

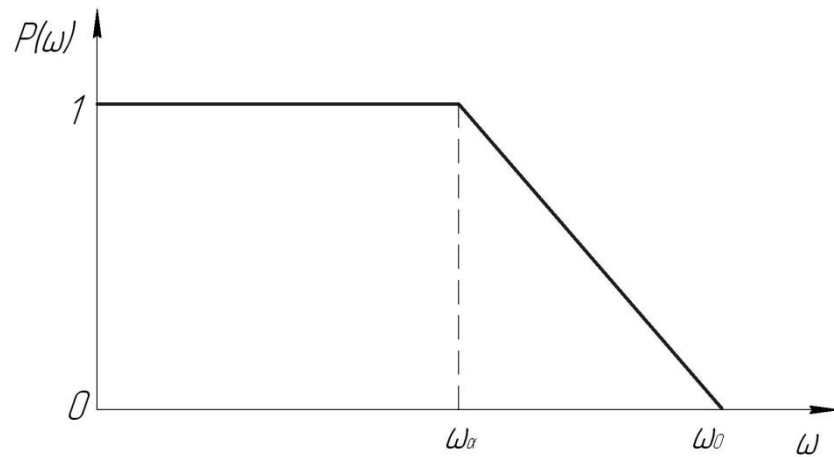


Рисунок 7.5 – Одинична трапеція

Побудову перехідної функції $h(t)$ автоматичної системи за цим методом зручно виконувати в наступній послідовності:

1. Знаходять передавальну функцію розімкненої системи $W(s)$ (за відповідним диференціальним рівнянням або за структурною схемою системи).

2. За передавальною функцією $W(t)$ будують логарифмічні амплітудну $L(\omega)$ та фазову $\varphi(\omega)$ частотні характеристики.

3. По значенням $L(\omega)$ та $\varphi(\omega)$ за допомогою P -номограми визначають значення і будують графік дійсної частотної характеристики замкненої системи (рис. 7.6 а).

4. Графік $P(\omega)$ розбивають на типові трапеції 1, 2, 3, для кожної з яких визначають її параметри (рис.7.6 б).

5. Для кожної з цих трапецій за допомогою таблиці h -функцій будують графік $h_i(t)$, при цьому відносний час перераховують у натуральний $t_i = \tau_i / \omega_{0i}$ (рис. 7.6 в)

6. Шукану перехідну функцію знаходять шляхом алгебраїчного додавання ординат перехідних функцій, які відповідають кожній трапеції (рис.7.6 в).

Точність метода досить достатня для інженерних розрахунків і в значній мірі залежить від точності апроксимації графіка $P(\omega)$ трапеціями.

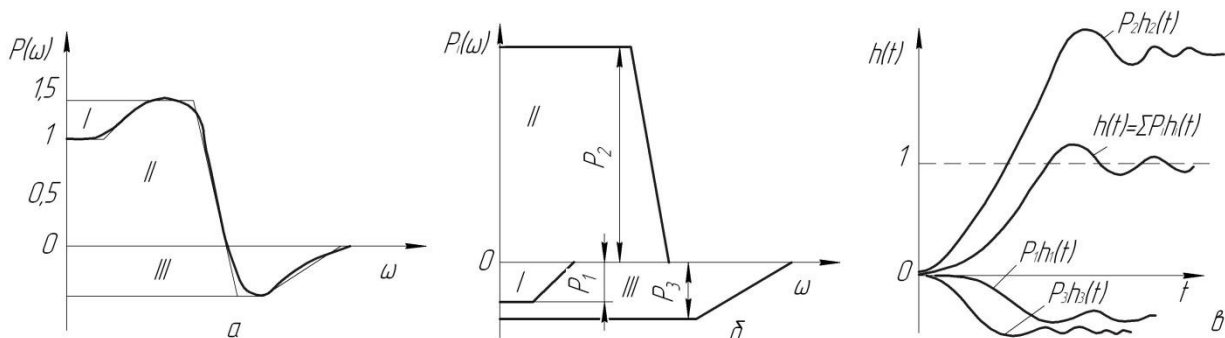


Рисунок 7.6 – Побудова перехідної функції за частотними характеристиками

Тема 8. Елементи систем автоматичного керування

8.1. Класифікація вимірювальних перетворювачів

Величезна різноманітність датчиків, які застосовуються у сучасній автоматичній, викликає необхідність їхньої класифікації.

1) За **вхідною величиною** (практично відповідає принципів дії):

Найменування датчика		Вхідна величина
Механічний.....	переміщення	твердого тіла
Електричний.....	електричний	розмір
Гідравлічний.....	переміщення	рідини
Пневматичний.....	переміщення	газу
Термічний.....	теплота	
Оптичний.....	світлова	величина
Акустичний.....	звукова	величина
Радіохвильовий.....	радіохвилі	
Ядерний.....	ядерні випромінювання	

2. Залежно від роду вхідної і вихідної величин датчики підрозділяються

1) Датчики-перетворювачі електричних параметрів інформації в електричні величини - вхідними і вихідними величинами таких перетворювачів є електричні величини. Це - перетворювачі розміру електричної величини (вимірювальні трансформатори, подільовачі струму і напруги), а також перетворювачі виду електричної величини, що перетворюють одну електричну величину в іншу (шунти, додаткові опори).

2) Датчики-перетворювачі неелектричних величин в неелектричні – вхідні та вихідні величини таких перетворювачів - неелектричні. Вони також можуть бути перетворювачами розміру тієї або іншої неелектричної величини (важелі, редуктори) або перетворювачами виду вхідної величини (консолі, мембрани, пружини та інші пружні механічні перетворювачі).

3) Датчики-перетворювачі електричних величин в неелектричні

4) Датчики-перетворювачі неелектричних величин в електричні

Останні дві групи є найбільш численними і різноманітними. Це пояснюється, з одного боку, численністю самих неелектричних величин, а з іншою - перевагами електричних методів вимірювань, і, відповідно, необхідністю перетворення неелектричних величин саме в електричні.

3. За родом енергії вихідної величини датчики поділяються на:

- **електричні;**
- **неелектричні.**

4. Електричні датчики за **принципом дії** поділяються на:

- **параметричні** (реагують на фізичний параметр) – у них енергія входу впливає на допоміжний електричне коло, змінюючи його параметри і модулюючи значення та характер зміни струму або напруги від стороннього

джерела енергії. Завдяки цьому одночасно підсилюється сигнал, що надходить на вхід датчика.

До них відносять: контактні, реостатні, потенціометричні, тензодатчики, терморезистори, ємкісні, індуктивні, електронні, фоторезисторні та ін.

Модуляція здійснюється за допомогою зміни одного з трьох параметрів – омичного опору, індуктивності і ємності. Відповідно до цього розрізняють групи **омічних, індуктивних і ємнісних** датчиків.

Кожна з цих груп може ділитися на підгрупи. Так, найбільшу групу омичних датчиків можна поділити на підгрупи: тензорезистори, потенціометри, терморезистори, фоторезистори. До другої підгрупи належать варіанти індуктивних датчиків – магнітопружні і трансформаторні. Третя підгрупа об'єднує ємнісні датчики різного типу.

Наявність стороннього джерела енергії є обов'язковою умовою роботи;

- **генераторні** (виробляють фізичний сигнал) - їх дія ґрунтується на виникненні електрорушійної сили під впливом різних процесів, пов'язаних з контрольованою величиною. Виникнення такої електрорушійної сили може відбуватися, наприклад, внаслідок електромагнітної індукції, термоелектрики, п'єзоелектрики, фотоелектрики та інших явищ, що викликають поділ електричних зарядів.

Відповідно до цих явищ генераторні датчики поділяються на індукційні, термоелектричні, п'єзоелектричні і фотоелектричні. Їм не потрібне додаткове джерело живлення.

5. **Неелектричні** датчики поділяються на механічні, пневматичні, гідравлічні та ін.

6. Вивчення властивостей датчиків і сенсорів за **фізичними явищами і ефектами**, покладеними в основу їх роботи, дозволяє з'ясувати загальні властивості, знайти загальний підхід до питання схемного і конструктивного рішення задач, пов'язаних з їх розрахунком, конструюванням і застосуванням.

За фізичними закономірностями, покладеними в основу принципу дії, датчики можуть бути розділені на наступні групи.

1) **Резистивні** електричні та механоелектричні, носієм вимірювальної інформації в яких є електричний опір. В основу принципу перетворення електричних резистивних сенсорів покладена залежність між напругою, струмом і електричним опором, яка визначена законом Ома. Принцип роботи механоелектричних резистивних сенсорів заснований на зміні електричного опору під дією вхідної перетворюваної механічної величини.

2) **Електростатичні** - сенсори, до яких відносяться первинні вимірювальні перетворювачі, носієм вимірювальної інформації в яких є електричний заряд. Розрізняють два основні різновиди електростатичних сенсорів: **ємнісні**, принцип дії яких заснований на взаємодії двох заряджених тіл, і **п'єзоелектричні**, виникнення електричного заряду в яких є наслідком дії на сенсор механічних зусиль, зміни температури і інших чинників.

3) Сенсори **електромеханічної** групи, принцип дії яких заснований на виникненні механічних переміщень їх рухомих елементів під впливом

електричного струму. Це *електродинамічні, феродинамічні та магнітоелектричні* сенсори.

4) *Гальваномagnetні* - сенсори, принцип дії яких заснований на використанні гальваномagnetних ефектів, суть яких полягає в зміні електричних параметрів сенсорів під впливом перетворюваного магнітного поля, зокрема зміні електричного опору (ефект Гауса) або появи е.р.с. (ефект Холла). Основними різновидами гальваномagnetних сенсорів є відповідно *магніторезистивні перетворювачі та перетворювачі Холла*.

5) *Електромагнітні* - сенсори, засновані на використанні електромагнітних явищ.

6) *Індукційні* - сенсори, принцип дії яких заснований на законі електромагнітної індукції.

7) *Теплові* сенсори - це первинні вимірювальні перетворювачі, в основу принципу роботи яких покладені фізичні закономірності, визначені тепловими процесами в об'єктах. Основними різновидами теплових сенсорів є *термомеханічні, терморезистивні та термоелектричні*.

Теплові сенсори - це в основному перетворювачі температури. Поряд з цим вони використовуються і для перетворень інших неелектричних величин, які проявляються через теплові процеси і функціонально пов'язані з тепловими величинами (наприклад, хімічний склад речовин, концентрація, швидкість руху рідин і газів, та інші).

8) *Електрохімічні* сенсори - це сенсори, принцип дії яких заснований на залежності електричних параметрів електролітичного середовища від складу і концентрації, температури та інших властивостей розчину, а також залежності електричної різниці потенціалів на межі розділу твердої і рідкої фаз від швидкості руху розчину. Вхідними сигналами електрохімічних датчиків можуть бути різноманітні величини інформації: якісний і кількісний склад складних рідких і газоподібних середовищ тощо. Основними різновидами електрохімічних сенсорів є *електролітичні резистивні сенсори, гальванічні, полярографічні, електрокінетичні, хемотронні*.

9) *Оптичні* сенсори - це сенсори, в основу принципу дії яких покладено перетворення потоку оптичного (світлового і теплового) випромінювання. Перетворення вимірювальної інформації здійснюється тут звичайно шляхом модуляції параметрів джерела випромінювання або оптичного каналу.

Функціональні можливості оптичних МС і область їх застосування значно розширилися у зв'язку з досягненнями оптоелектронної техніки, зокрема, із створенням оптичних квантових генераторів, світлодіодів і т.п.

10) *Квантові* сенсори – це сенсори, принцип дії яких заснований на вибіркового поглинанні або випромінюванні електромагнітних хвиль речовиною, поміщеною в магнітне поле.

8.2. Датчики переміщення

8.2.1. Механічні чутливі елементи датчиків

Найбільш простими засобами одержання інформації про різні параметри технологічних процесів (положення деталей, тари, продукту на транспорті, рівня води в ємності й ін.) служать механічні датчики - щупи, стрижні, ползки, котки тощо.

Механічний чутливий елемент (щуп) зв'язаний, як правило, із перетворювально-підсилювальною ланкою й перебуває в стані силового замикання із джерелом інформації. Певне силове настроювання щупа дозволяє виділити корисний сигнал, наприклад, появу тари на транспорті.

У момент приходу банки 2 до положення, обумовленому віссю 9 (мал.8.1 б), щуп 4 починає відхилятися й своїм протилежним кінцем замикає контакти 7 й 8, які дають сигнал у ланцюг керування “одна банка пройшла”. Сигнал керування може являти собою одиничний електричний імпульс, що зчитується системою керування й використовується для підрахунку кількості банок, зупинки транспортера, подачі ящиків і т.д. Після проходження банки 2 щуп звільняється й під дією пружини 5 опускається в положення 9, очікуючи приходу наступної банки 3 і т.д.

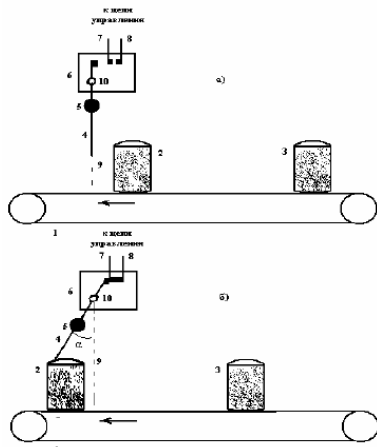


Рисунок 8.1 – Датчик положення з механічним чутливим елементом:

1- транспортер; 2, 3- банки, що рухаються; 4- чутливий елемент-щуп; 5- пружина; 6- корпус датчика положення банки; 7, 8- електричні контакти; 9- вісь нейтрального положення щупа; 10- вісь обертання щупа; а) положення щупа до підходу банки; б) положення щупа після підходу банки.

До механічних чутливих елементів відносяться також різні типи пружинних, маятникових й осьових акселерометрів. Іншим прикладом механічного датчика є відомий “поплавок” (рис.8.2) для визначення рівня рідини. У бак 1 надходить рідина 2. Поплавок 4, з'єднаний важелем 3 з контактною групою 6 й 7, укладеної в корпус 5.

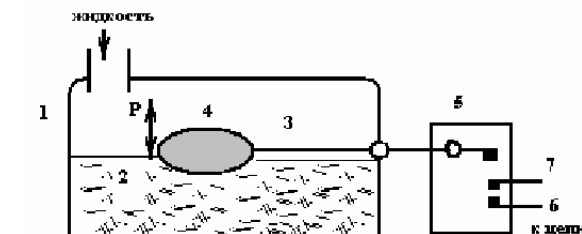


Рисунок 8.2 – Механічний датчик “поплавок” для відстеження рівня рідини в баці: 1- бак для рідини; 2 - рідина; 3- важіль; 4- поплавок; 5- корпус контактної групи; 6- 7 - контактна група.

При надходженні рідини в бак 1 поплавок 4 піднімається разом з її рівнем. При досягненні заданого рівня рідини поплавець під дією його сили, що виштовхує, Р переміщає важіль 3 нагору, що своїм протилежним кінцем

замикає контактну групу 6-7, що дає сигнал керування, наприклад, на припинення подачі рідини або її відкачок.

8.2.2. Потенціометричні чутливі елементи

Датчики переміщень перетворюють лінійні або кутові переміщення в сигнал, зручний для використання в схемах контролю й керування. Для виміру лінійних і кутових переміщень на постійному й змінному струмі широке застосування одержали потенціометричні датчики.

Їхня основна перевага - простота й відсутність необхідності наступного посилення, якщо вони застосовуються для виміру. Основні недоліки - наявність ковзного контакту.

У таких датчиках чутливим елементом є потенціометр - змінний резистор, рухомий контакт механічно пов'язаний із пристроєм, параметр якого необхідно виміряти. Потенціометричні пристрої широко використовуються для перетворення лінійного або кутового переміщення (вхідна величина) в електричний сигнал (вихідна величина).

Конструктивно потенціометричний вимірювальний пристрій (рис.8.3, 8.4) складається зі змінного резистора 1 із движком 2, до якого прикріплений механічний зв'язок 3 з переміщуваним об'єктом 4. Потенціометр може бути виконаний лінійним або круговим. У першому випадку вимірюються лінійні переміщення, у другому - кутові. Обмотка резистора виконується з металевого дроту (константа, манганіну, нікеліну), навитого на каркас, або металевих плівок. На вхід потенціометра подається напруга U_1 .

Об'єкт, переміщення X якого необхідно виміряти, через механічний зв'язок переміщає движок потенціометра на ту ж відстань X або кратну їй, або на певний кут, залежно від конструкції зв'язку.

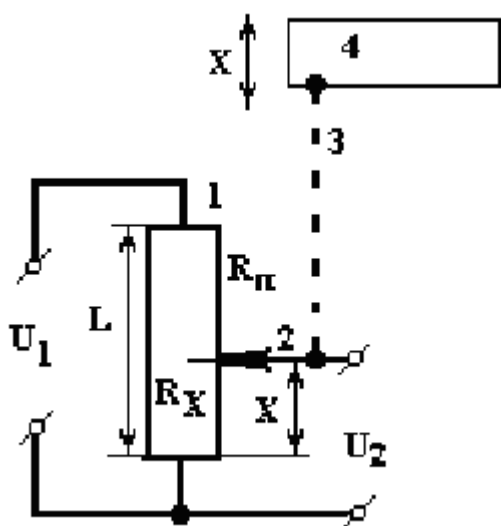


Рисунок 8.3 – Потенціометричний чутливий елемент: 1 - потенціометр; 2 - движок потенціометра; 3 - твердий зв'язок; 4- переміщуваний об'єкт; L - довжина переміщення движка; X - переміщення об'єкта; R_n – повний опір потенціометра; R_x – вимірюваний опір повзуна; U_1 - вхідна напруга; U_2 - вихідна напруга датчика.

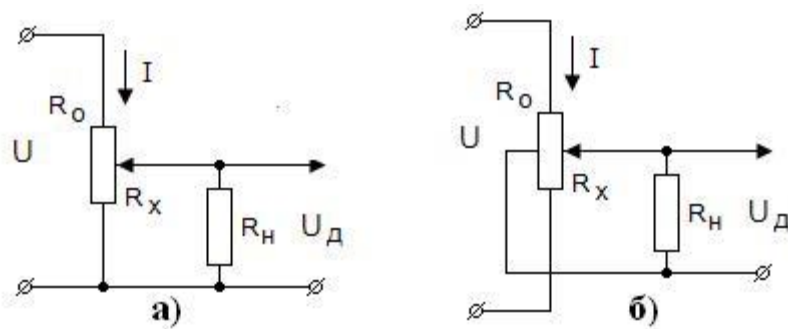


Рисунок 8.4 – Потенціометричні датчики: а) полярний, б) реверсивний.

Напруга на виході U_2 визначається з виразу:

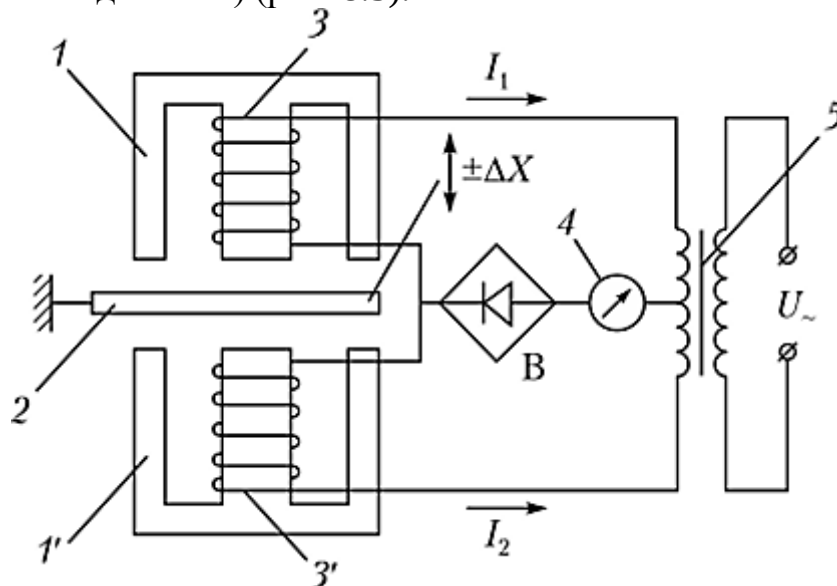
$$U_2 = U_1 \frac{R_x}{R_n} = U_1 \frac{X}{L} = kX$$

де $k = U_1/L$ - постійна датчика.

Потенціометричні датчики прості по конструкції, дешеві. Однак, через застосування механічних частин, що рухаються, мають значну похибку й низьку надійність.

8.2.3. Диференціальний індуктивний датчик

Для підвищення чутливості застосовують диференціальне включення двох обмоток у міст (диференціальний індуктивний датчик, що складається з двох незалежних датчиків) (рис. 8.5).



Риснок 8.5 – Диференціальний індуктивний датчик

Цей датчик складається з двох магнітопроводів 1, 1' з котушками 3, 3' і спільним якорем 2. Для живлення диференціальних індуктивних датчиків використовується джерело змінного струму на трансформаторі 5 із зведеною вторинною обмоткою. Середня точка цієї обмотки з'єднується із загальною точкою обмоток котушок 3, 3' через прилад 4, що реєструє струм в цьому колі, і навантаження, розташоване в блоці В. В цьому ж блоці розташовується демодулятор, приєднаний до навантаження. Демодулятор

здійснює перетворення модульованого по амплітуді змінної напруги на навантаженні в аналоговий вихідний сигнал датчика.

При середньому положенні якоря 2, коли повітряні зазори однакові, індуктивні опори котушок 3, 3' також однакові, струм в діагоналі, вимірюваний приладом 4, буде рівним нулю. При відхиленні якоря під дією контрольованої величини $I \neq 0$. Характеристика датчика щодо амплітудного значення струму через навантаження має вигляд, показаний на рис. 8.6.

Характеристика диференціального датчика по струму, як впливає з рис. 8.6, не змінює полярність вихідного струму при зміні повного опору котушок. При використанні демодулятора, або, що те ж саме, - фазочутливого випрямляча (ФЧВ) вдається встановити напрям відхилення якоря. Характеристика реверсивного датчика з ФЧВ має вигляд, як на рис. 8.7.

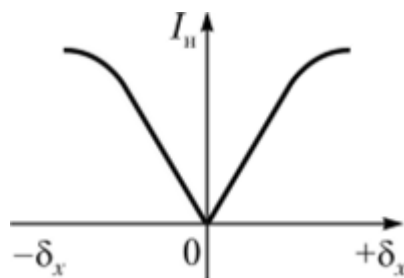


Рисунок 8.6 – Статична характеристика диференціального індуктивного датчика

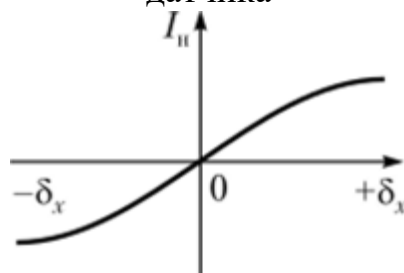


Рисунок 8.7 – Характеристика реверсивного датчика з ФЧВ

8.2.4. Індукційні чутливі елементи

Індукційні перетворювачі підрозділяються на два типи: з котушкою, що має феромагнітну деталь, яка переміщується відносно нерухомої котушки й обертову котушку відносно постійного магніту.

Індукційний датчик з котушкою 1, намотаною на сердечник 2, і феромагнітною деталлю, що переміщається, 3 зображений на рис.8.8. Феромагнітна деталь 3 механічно пов'язана з деталлю, що переміщається, 4 (валом, що обертається зі швидкістю ω). У цьому випадку котушка 1 періодично пронизується змінним магнітним потоком Φ , у результаті чого в ній виникне електрорушійна сила. При обертанні вала 4 на виході котушки виникають імпульси напруги. Період виникнення імпульсів точно відповідає частоті обертання вала $f = \omega / 2\pi$:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}.$$

Частота появи імпульсів f дорівнює частоті обертання вала. Для підрахунку цієї частоти застосовують лічильники імпульсів.

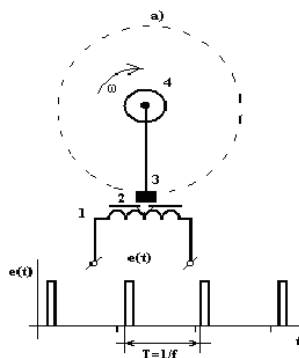


Рисунок 8.8 – Індукційний чутливий елемент з феромагнітною деталлю, що переміщується.

Обертові трансформатори та їх пари

До індукційних датчиків (вимірювальних елементів) належать також датчики змінного струму, що мають вигляд електричних мікромашин і працюють на законі електромагнітної індукції. Найчастіше серед них використовуються сельсини і сельсинні пари, а також обертові трансформатори (ОТ). Обертові трансформатори (ОТ) так само, як ІД, призначені для перетворення кутових або лінійних переміщень в електричний сигнал змінного струму і використовуються в якості вимірювального елемента САК.

За своєю конструкцією обертовий трансформатор подібний до асинхронного двигуна з фазним ротором і має на статорі і роторі симетричні двофазні обмотки зі зрушенням у просторі на 90° (рис.8.9). Кінці обмотки ротора виводяться назовні за допомогою щіток або (при обмеженому куті повороту) за допомогою гнучких провідників.

Внаслідок зрушення обмотки на 90° взаємна індуктивність між фазами обмотки статора, як і між фазами обмотки ротора, дорівнює нулю. У той же час взаємна індуктивність між фазами обмоток статора і ротора повинна з можливо більшою точністю змінюватися залежно від кута α за синусоїдальним законом.

В ОТ первинна обмотка розміщується на статорі мікромашини, а вторинна обмотка – на роторі (рухомій частині). Первинна і вторинна обмотки, таким чином, здатні переміщатись одна відносно іншої шляхом повороту.

При цьому напруга вторинної обмотки (вихідна напруга) залежить не лише від коефіцієнту трансформації $k_{Tp} = \frac{w_2}{w_1}$, але й від кута повороту α :

$$U_2 = k_{Tp} U_1 \cos \alpha$$

Основна властивість ОТ – наявність залежності між кутом повороту його ротора і ЕРС (напругою), що індукується у вторинній обмотці.

Відповідно до вигляду цієї залежності розрізняють:

- синусно-косинусні ОТ (СКОТ), в яких є дві вторинні обмотки з магнітними осями, зсунутими у просторі на 90° ; ЕРС, що індукується в одній з них, пропорційна $\sin \alpha$, а в іншій – $\cos \alpha$;
- лінійні ОТ (ЛОТ), в яких ЕРС, що індукується у вторинній обмотці, пропорційна куту α .

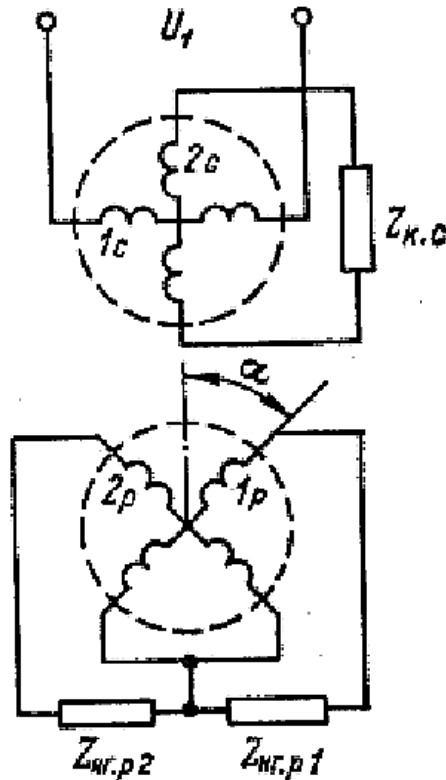


Рисунок 8.9 – Схема обертового трансформатора

Динамічні якості ОТ як елемента САК визначаються його передавальною функцією, яка має вигляд:

$$H(p) = \frac{U_{\text{вих}}(p)}{\alpha(p)} = k$$

тобто відповідає передавальній функції підсилювальної ланки.

Якщо виникає задача виміряти похибку між кутовими положеннями вхідного і вихідного валу системи, то використовуються пари обертових трансформаторів.

До переваг ОТ можна віднести:

- висока точність
- простота конструкції;
- надійність роботи (відсутність деталей, яка підлягає спрацюванню);
- незначні зусилля, необхідні для повороту ротора;
- малі габарити і вага.

Основними недоліками ОТ є:

- недосконалість технології виготовлення (несиметричність обмоток, ексцентриситет ротора, різниця магнітної провідності вздовж різних вісей машини, наявність короткозамкнутих витків обмоток);
- наявність похибок вимірювання внаслідок відмінності реальних умов експлуатації від розрахункових.

8.3. Датчики температури, тиску, рівня, витрат, лінійних та кутових переміщень, швидкості, зусиль, моментів, деформації, вологості, густини, освітленості, хімічного складу речовин тощо та їх характеристики

8.3.1. Датчики PIR

Піроелектричний інфрачервоний (Pyroelectric Infrared - PIR) датчик складається з двох слотів, заповнених матеріалом, який реагує на інфрачервоне випромінювання і тепло. Типові варіанти застосування таких датчиків - це теплові датчики руху систем безпеки. Зазвичай такі датчики оснащуються лінзою Френеля, за допомогою якої формується зона виявлення. Така зона має форму арки, що розкривається назовні. Коли тепле тіло входить або, навпаки, залишає зону виявлення, чутливі елементи формують електричний сигнал. В PIR-датчиках використовуються кристалічні матеріали, які здатні генерувати електричний струм під впливом інфрачервоного випромінювання.

PIR-датчики добре працюють в діапазоні хвиль від 8 до 14 мкм, цей діапазон характерний для випромінювань людського тіла.

Два елементи PIR, що формують дві зони виявлення, дозволяють не тільки відслідковувати весь простір кімнати, але і визначати напрямок переміщень.

8.3.2. Датчик Холла

Датчик Холла - це смужка металу, через яку пропущений електричний струм. Потік заряджених частинок, що проходять через магнітне поле, відхиляється від прямолінійного напрямку. Якщо напрямок магнітного поля перпендикулярно плоскому провіднику, то на його протилежних сторонах виникатиме різниця потенціалів, обумовлена тим, що різнойменно заряджені частинки будуть збиратися на протилежних його сторонах.

Таким чином, одна сторона плоского провідника виявиться заряджена позитивно, а інша негативно, і виникне різниця потенціалів. Така різниця потенціалів називається напругою Холла, а сам ефект виникнення цієї напруги називається ефектом Холла. Це проілюстровано на рис. 8.10. Коли через металеву смугу, вміщену в магнітне поле, проходить струм, електрони рухаються до однієї її сторони, а дірки - до іншої.

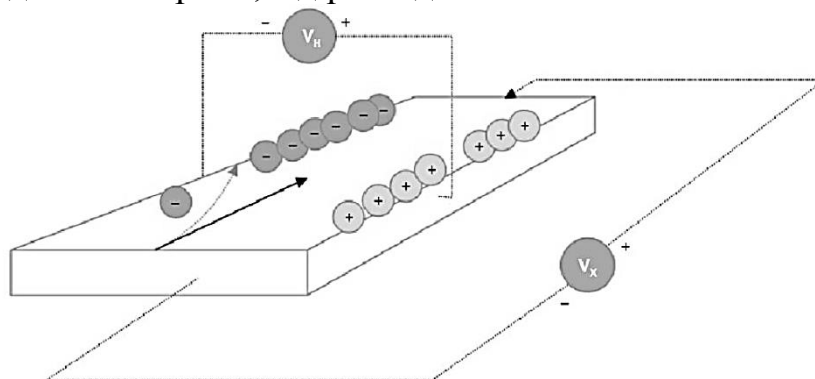


Рисунок 8.10 – Ілюстрація ефекту Холла

Таке розшарування породжує електричне поле, яке можна виміряти. Якщо поле досить сильне, воно нейтралізує дію магнітного поля, і носії заряду зберігають прямолінійний рух.

Ефект Холла застосовується в датчиках струму, для вимірювання змінного і постійного струму. Існує два типи таких датчиків: з розімкненим і замкнутим контуром. Датчики з замкнутим контуром дорожчі, їх часто використовують у схемах з живленням від батарей.

Типова область застосування датчиків Холла: датчики положення, магнітometri, високонадійні перемикачі та показчики рівня води. Вони використовуються також в промислових датчиках для вимірювання швидкості обертання різних вузлів і механізмів. Крім того, що ці датчики недорогі у виготовленні, вони не вимогливі до умов експлуатації та можуть працювати в найсуворіших умовах.

8.3.3. Фотоелектричні датчики

Датчики для виявлення світла або визначення його інтенсивності. Такі пристрої необхідні, наприклад, в системах безпеки, інтелектуальних комутаторах або в системах управління вуличним освітленням. Існує два типи таких датчиків, принцип дії яких зрозумілий з їх назви. Фоторезистор змінює опір в залежності від інтенсивності світла, а фотодіод перетворює світло в електричний струм.

Фоторезистори виготовляються з напівпровідників з високим опором. Їх опір зменшується при збільшенні інтенсивності освітлення. У темряві опір фоторезистора може мати досить високий опір (порядку мегаом). Фотони, що поглинаються напівпровідником, переводять електрони в зону провідності, тим самим збільшуючи провідність матеріалу. Фоторезистори чутливі до довжини хвилі падаючого світла.

Фотодіоди - це повноцінні напівпровідникові прилади з р-п-переходом. Такі пристрої реагують на світло, створюючи електронно-діркову пару. Потік дірок, що рухаються до анода, і електронів, що рухаються до катода, створює електричний струм. Таким чином працюють традиційні сонячні батареї, що виробляють електрику під впливом сонячних променів.

Тема 9. Пристрої задавання, порівняння та засоби відображення інформації

9.1. Пристрої задавання та порівняння

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

Характер заданого впливу і обсяг інформації, що міститься в ньому визначають конструкцію задаючого пристрою. Найпростішими задаючими пристроями є потенціометри, в яких входною величиною є переміщення, а вихідною - електричний сигнал (струм, напруга). Наприклад, потенціометр, движок якого на початку процесу встановлено в певне положення, тобто з виходу якого подається в САР певна напруга, може служити простим задаючим пристроєм для стабілізуючої системи.

Якщо ж движок потенціометра пов'язаний з механізмом, що здійснює його переміщення протягом робочого процесу, це буде задаючий пристрій зі змінною заданою дією.

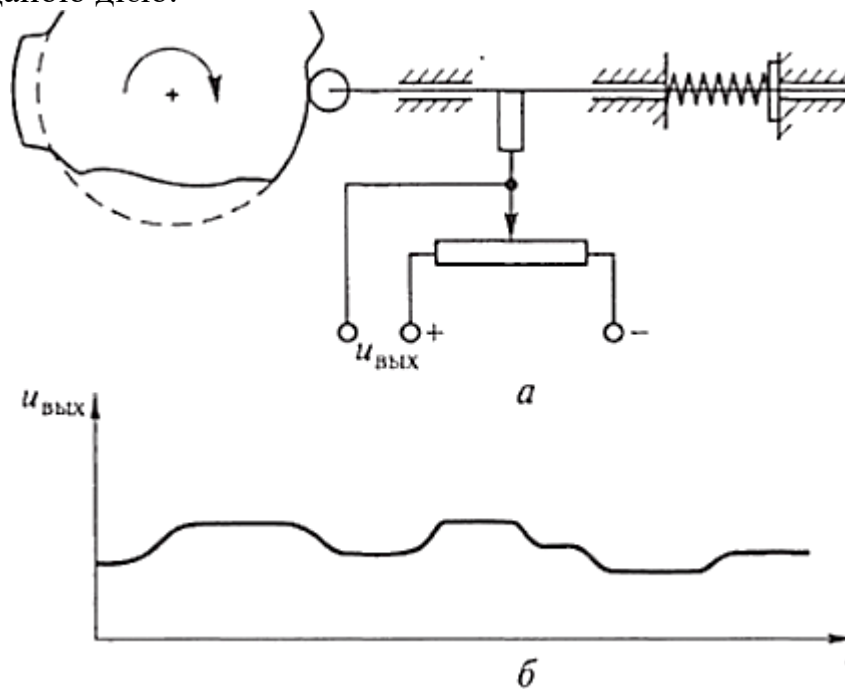


Рисунок 9.1 – Схема командоапарата неперервної дії (а) і діаграма зміни його вихідного сигналу в часі (б)

Найбільш прості автоматичні системи з постійною програмою без інформаційних ланок зворотного зв'язку зазвичай працюють з періодичної повторюваністю робочих циклів, тобто після закінчення одного циклу автоматично починається наступний, і т.д.

Як задають пристроїв в таких системах використовують командоапарати, які можуть бути механічними, електричними, гідравлічними, а також комбінованими.

За видом вихідної величини розрізняють командоапарати безперервної (рис. 9.1) і дискретної (рис. 9.2) дії.

Принцип дії командоапаратів всіх типів однаковий: розподільний вал обертається з постійною швидкістю від синхронного двигуна або приводу самого автоматизованого пристрою, роблячи один оборот за заданий час циклу. На валу насаджені кулачки, що впливають на електричні контакти і важелі, що відкривають та закривають пневмоклапани або інші керівні органи. Фазні кути між кулачками можна регулювати, так як конструкція кріплення передбачає можливість кутових зсувів. Можна міняти і форму кулачків.

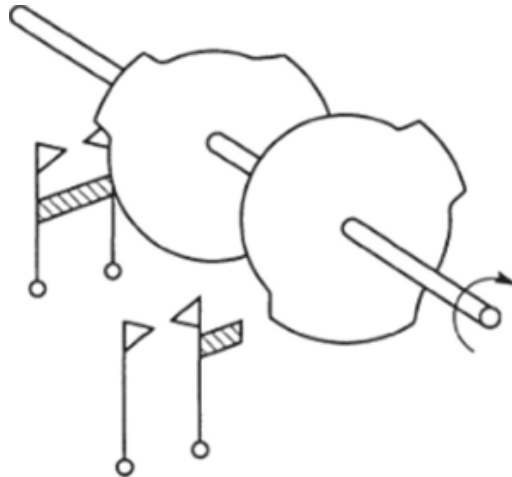


Рисунок 9.2 – Схема командоапарата дискретної дії (контактного)

За один оборот валу всі кулачки і важелі формують один цикл задаючі команди, що посилаються в автоматичну систему. При цьому фактичне виконання команд не впливає на хід пристрою, що задає (крім аварійних режимів, коли прилади захисту вимикають всю систему).

В автоматичних програмних системах, що мають коло зворотного зв'язку, використання задаючих пристроїв типу командоапаратів не завжди прийнятне. Зокрема, вони не можуть застосовуватися, коли початок наступної операції повинно залежати від закінчення попередньої. Як задаючі пристроїв для таких систем використовують крокові командоконтроллери або релейні логічні схеми.

Дія крокового командоконтроллера аналогічна дії командоапарата; різниця полягає лише в тому, що в останньому перехід від одного стану комутованих ланцюгів до іншого здійснюється не за часовим законом, а в залежності від команд, що надходять від керованого об'єкта.

9.2. Застосування елементів порівняння

Елемент порівняння - пристрій, що входить до складу систем автоматичного керування, порівнює сигнали, які надходять від задавача і системи автоматичного контролю (датчика) та подає одержаний сигнал розузгодження на регулятор.

У кінематичних схемах порівняння механічних величин може здійснюватися за допомогою важеля (рис. 9.3, а), рівновага якого визначається співвідношенням

$$F_x l_x = F_z l_z,$$

де F_x, F_z - відповідно контрольоване і задане зусилля; l_x, l_z - плечі важеля, відповідні контрольованому і заданому зусиллям.

У відповідності з цим виразом сигнал неузгодженості

$$\varepsilon = F_z - F_x \frac{l_x}{l_z}.$$

Отже, важіль може бути використаний для порівняння зусиль.

Порівняння заданого $p_{зад}$ і контрольованого p_x тисків в гідравлічних і пневматичних пристроях можна розглянути на прикладі схеми, наведеної на рис. 9.3, б. При $p_x = p_{зад}$ вихідні сигнали однакові: $P_1 = P_2$, а ВМ знаходиться в стані рівноваги. При $p_x > p_{зад}$ і $P_2 > P_1$, поршень переміщується вгору. При $p_x < p_{зад}$ поршень переміщується вниз.

До електричних порівнюючих пристроїв відносяться мостові, потенціометричні, трансформаторні, диференційно-трансформаторні схеми, електромеханічні пристрої, нуль-органи та ін.

Мостова схема порівняння постійного струму (рис. 9.3, в) складається з задаючого резистора $R_{зад}$, датчика R_x , опір якого залежить від зміни керованої величини, і двох зразкових резисторів з опорами R_1 і R_2 . На одну з діагоналей схеми подають напруга живлення $U_{живл}$, з іншої діагоналі знімають вихідну напругу $U_{вих}$, яка живить ВМ (наприклад, поляризоване реле).

Умова рівноваги мостової схеми визначається рівністю добутків опорів її протилежних плечей:

$$R_z R_1 = R_x R_2,$$

відповідно до якого сигнал неузгодженості

$$\varepsilon = R_z - R_x \frac{R_2}{R_1}.$$

Вважаючи $R_z = x$ і $R_x R_2 / R_1 = y$, отримаємо вихідний вираз для сигналу неузгодженості:

$$\varepsilon = x - y$$

Електричний пристрій порівняння може бути виконано на базі операційного підсилювача (рис. 9.3, г). При цьому на датчик R_x подається напруга $+U_x$, а на задатчик $R_{зад}$ – напругу зворотної полярності $-U_{зад}$.

Вихідна напруга підсилювача

$$U_{вих} = -R_{zz} \left(\frac{U_x}{R_x} - \frac{U_z}{R_z} \right),$$

де R_{zz} – опір зворотного зв'язку підсилювача.

При використанні операційного підсилювача для порівняння напруг U_x і $U_{зад}$, вважаючи $R_x = R_z = R_{zz}$, отримують вираз $U_{вих} = U_z - U_x$.

Операційний підсилювач може бути також використаний для порівняння опорів R_x і R_z . Тоді при $U_x = |U_z|$ отримують значення вихідної напруги підсилювача, залежне від зміни R_x . У цій схемі результат порівняння має неперервну форму.

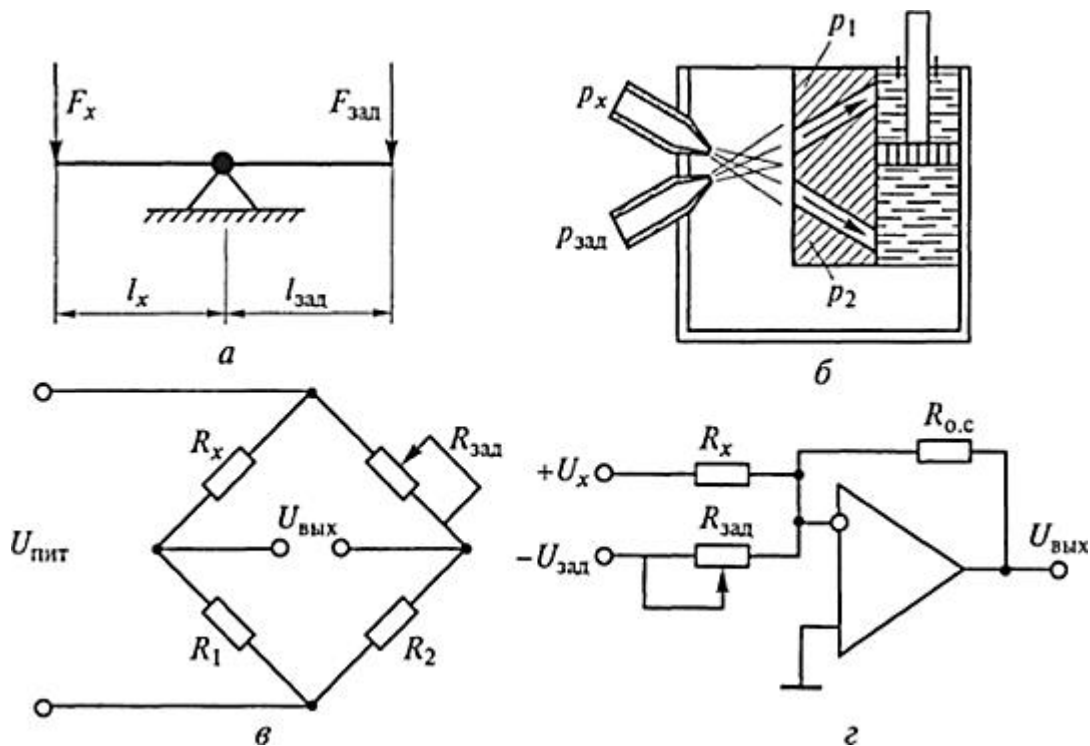


Рисунок 9.3 – Схеми порівнюючих пристроїв: а - на базі важеля; б - на пневматичних елементах; в - електрична мостова; г - на базі операційного підсилювача

Поряд з розглянутими пристроями в автоматичі широко поширені пристрої порівняння дискретного типу, які можуть представляти відхилення у вигляді числа (це різні лічильники, крокові шукачі тощо) або у вигляді логічних категорій, наприклад: $U_1 > U_2$, $I_1 < I_2$. Прикладами пристроїв останнього типу можуть служити різні релейні елементи.

Найпростіші реле постійного або змінного струму спрацьовують, коли струм в ланцюзі спрацьовування досягає більшого значення, ніж встановлена для них межа. Отже, факт спрацьовування - це сигнал «більше»:

$$I > I_{\text{спр}}.$$

Поляризовані реле, що мають кілька обмоток, можуть здійснювати алгебраїчне підсумовування декількох величин. Напрямок перекидання якоря визначається знаком сигналу неузгодженості.

Як елементи порівняння можуть використовуватися і деякі перетворювачі інформації – диференціальний трансформаторний перетворювач, селсин, золотниковий перетворювач.



Рисунок 9.4 – Струминний перетворювач

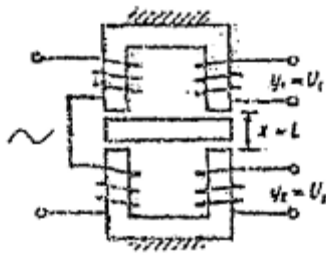


Рисунок 9.5 – Диференціальний трансформаторний перетворювач

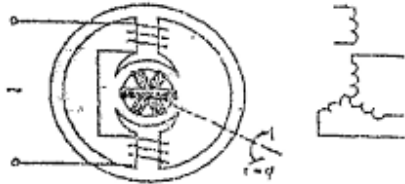


Рисунок 9.6 – Сельсин

Сельсини (рис. 9.6) являють собою особливий вид електричних машин змінного струму потужністю від декількох ватів до декількох сотень ват (менше кіловата). Служить сельсин для дистанційної передачі механічного кута повороту електричним шляхом між пристроями, що не мають між собою механічного зв'язку.

Сельсин має статор і ротор, на яких розташовані обмотки змінного струму. Існують сельсини з однокотушковою обмоткою на статорі і трьохкотушковою на роторі, або навпаки, з трьохкотушковою обмоткою на статорі і однокотушковою на роторі, і, нарешті, з трьохкотушковою обмоткою на статорі і з такою ж обмоткою на роторі.

За своїм призначенням в схемах авторегулювання сельсини діляться на:

- сельсин-датчики,
- сельсин-приймачі
- диференціальні.

Дія сельсинного зв'язку заснована на принципі електромагнітної індукції. Змінний струм однокотушечної обмотки статора індукує в трьохкотушечній обмотці ротора струми, величини яких залежать від відносного розташування обмоток ротора і статора. Якщо ротори обох сельсинів розташовані однаково по відношенню до своїх статорів, то струми в сполучних проводах роторів рівні й протилежні між собою, і тому струм в кожній котушці дорівнює нулю. Як наслідок, дорівнює нулю крутний момент на валу одного і іншого сельсинов.

Якщо тепер вручну або іншим способом повернути ротор сельсин-датчика на певний кут, то порушиться рівновага струмів між роторами, і на валу сельсин-приймача виникне обертальний момент, завдяки чому його ротор буде повертатися до тих пір, поки не зникне нерівновага струмів, тобто поки цей ротор не прийме те ж положення, що і сельсин-датчик.

9.3. Цифро-аналоговий перетворювач

Служить для перетворення коду в пропорційний йому аналогову форму напруги або струму з метою відображення на показуючих 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:

$$U_{вих} = U_{етал} (a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + \dots + a_n 2^{-n})$$

де $a_1 \dots a_n$ – коефіцієнт двійкових розрядів.

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

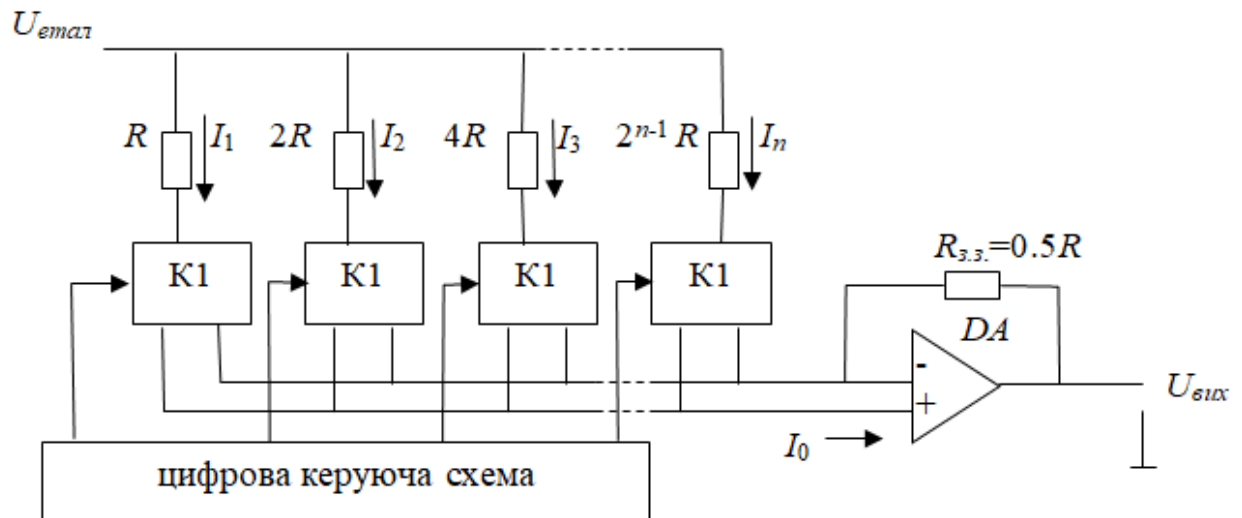


Рисунок 9.7 – Схема ЦАП

Тема 10. Елементи та пристрої дискретної дії

10.1. Релейні елементи

Релейними елементами (РЕ) називають пристрої, що здійснюють квантування сигналу за рівнем. Їх прикладами є різноманітні реле: механічні, електричні, гідравлічні, пневматичні й інші, у яких вихідна величина змінюється стрибкоподібно при досягненні входним сигналом певних заданих значень.

На рис. 10.1 наведена схема звичайного електромагнітного реле. За будь-якого закону зміни входного струму i_1 вихідний струм може набувати лише одне з двох значень: $i_2 = 0$ або $i_2 = U/R$.

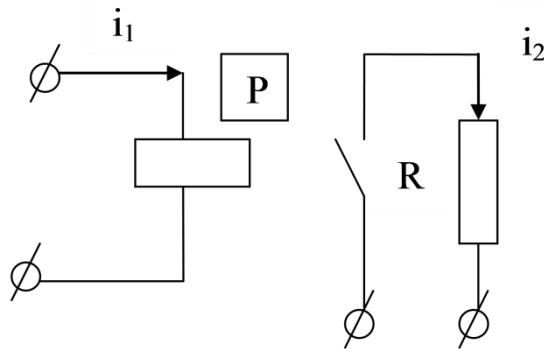


Рисунок 10.1 – Структурна схема релейного елемента

В системах автоматики іноді потрібно застосовувати електромагнітні реле, що реагують на полярність електричного сигналу. У цих випадках використовують **поляризовані** реле. У магнітній системі поляризованих реле поряд із звичайним магнітопроводом додатково встановлюють постійний магніт. Тому рухома частина переміщується в той або інший бік під загальною дією двох магнітних потоків: від котушок реле і від постійного магніту. Такі реле реагують як на значення входного сигналу, так і на його полярність.

Для одержання в електромагнітному механізмі знакозмінної залежності сили притягання від напрямку входного сигналу необхідна наявність двох магнітних потоків: потоку, що створюється струмом в обмотці реле, і постійного, незмінного за величиною і напрямком, що створюється зазвичай постійним магнітом. Таким чином, при одному напрямку струму в обмотці реле магнітні потоки будуть додаватись, а при іншому напрямку струму – відніматись.

Чутливість до напрямку (поляризація) здійснюється за рахунок постійного магнітного потоку. За конструктивною схемою магнітного кола розрізняють поляризовані реле, що побудовані за диференційною і мостовою схемами. За кількістю стійких положень якоря розрізняють двопозиційні і трипозиційні поляризовані реле. Поляризоване реле з диференційною схемою магнітного кола показано на рис. 10.2. Робочий (керувальний) магнітний потік Φ_y створюється при проходженні струму по обмотці реле,

що складається з двох однакових половин, ввімкнених послідовно та узгоджено. Постійний (поляризувальний) магнітний потік Φ_n створюється постійним магнітом 2. Котушки реле розміщені на нерухомому осерді 3. Якір 4 може обертатись відносно вісі О в робочому зазорі d. На якорі розміщений рухомий контакт, який може замикатись з нерухомими контактами 5.

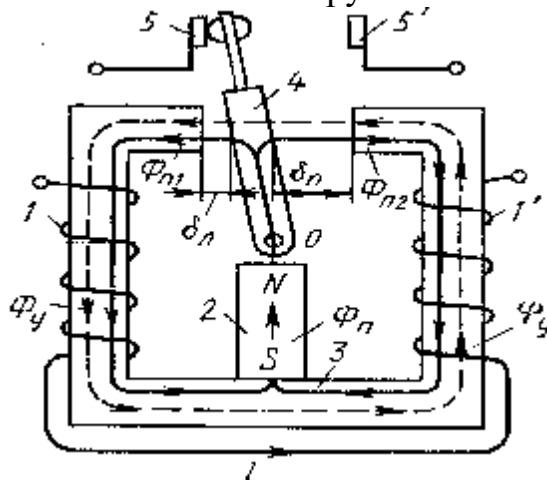


Рисунок 10.2 – Поляризоване реле

Для напрямків струму і магнітних потоків, що наведені на рис. 10.7, результуюче тягове зусилля змусить якір перекинутись з лівого положення в праве. При відключенні вхідного сигналу ($I=0$) якір залишається в тому ж положенні, що він займав до вимикання сигналу. Реле, яке показано на рис. 10.2, є двопозиційним. Підсумкове електромагнітне зусилля, що діє на якір поляризованого реле, направлене в сторону того зазору, в якому керувальний і поляризувальний магнітні потоки додаються.

Магнітоелектричні реле – електромеханічні реле, робота якого заснована на взаємодії магнітного поля постійного магніту зі струмом в обмотці, підведеним ззовні. Можуть працювати тільки на постійному струмі. За будовою аналогічні приладам відповідної системи, але замість покажчика (стрілки) використовують якір (у вигляді рамки) з контактами. Цей тип належить до найбільш чутливих реле. Керують навантаженням малої потужності 0,1...0,2 Вт.

Електродинамічні реле – за принципом дії подібні до магнітоелектричних, але в них магнітне поле утворюється спеціальною обмоткою збудження, що розміщена на магнітопроводі (замість постійного магніту застосовується обмотка зі струмом). Працює як на постійному так і на змінному струмі. Використовують як реле зсуву фаз (спрацьовують при певному куту між фазами).

Індукційне реле – використовує явище взаємодії зміни магнітного потоку, що створюється обмоткою реле, та струму, індукується в рухомому диску, циліндрі або короткозамкненій рамці.

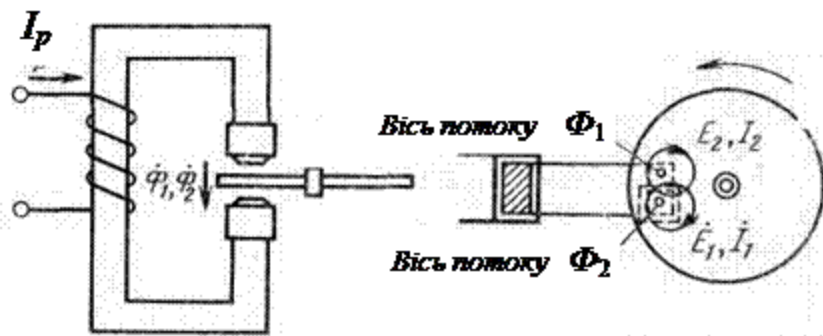


Рисунок 10.3 – Принцип дії індукційного реле

Принцип роботи індукційного реле базується на використанні сил взаємодії змінних магнітних полів нерухомих обмоток (однієї чи двох) зі струмами, які індукуються цими полями в рухомому електропровідному елементі. Під дією вхідного сигналу утворюють зусилля обертання ($F = kI_1I_2\cos\varphi$). Такі реле працюють тільки на змінному струмі. Індукційні реле використовуються тільки як реле потужності, фази, струму, частоти.

Індукційна система з диском відрізняється невисокою чутливістю і значним часом спрацювання через доволі великий момент інерції самого диска. Для створення більш чутливих та швидкодіючих індукційних реле використовують системи з рухомим циліндричним ротором або сектором.

Феромагнітні реле – реагують на зміну магнітної величини (магнітного потоку, напруженості магнітного потоку) або магнітних характеристик феромагнітних матеріалів (магнітної проникливості, залишкової індукції).

Електронні та іонні реле реагують безпосередньо на силу струму, напругу, під дією яких проходить стрибкоподібна зміна провідності електричних, напівпровідникових або іонних приладів.

Електротеплові реле – базуються на зміні лінійних, об'ємних величин, агрегатного стану, зміні питомого опору або діелектричної проникності під дією температури.

Резонансні реле – використовують явище резонансу в електричних коливальних системах (застосовують в частотних пристроях захисту та телемеханіки).

Магнітокеровані контакти – геркони (скорочення від *герметичний контакт*), герконові реле.

Контактні пружини герконів виготовляють з феромагнітного матеріалу і запаюють у скляну ампулу невеликих розмірів (діаметр 3...6 мм, довжина 20...50 мм).

Геркони бувають вакуумні й газонаповнені (наповнені азотом, аргонном). Ізоляція контактів від навколишнього середовища запобігає їх забрудненню і корозії. Тому кількість спрацювань герконів підвищується до $10^7 \dots 10^9$ циклів.

Якщо геркон помістити в магнітне поле (рис. 10.4), між феромагнітними пружинами виникають сили взаємодії, внаслідок чого пружини притягуються або відштовхуються. Конструктивно рухомою є одна з пружин.

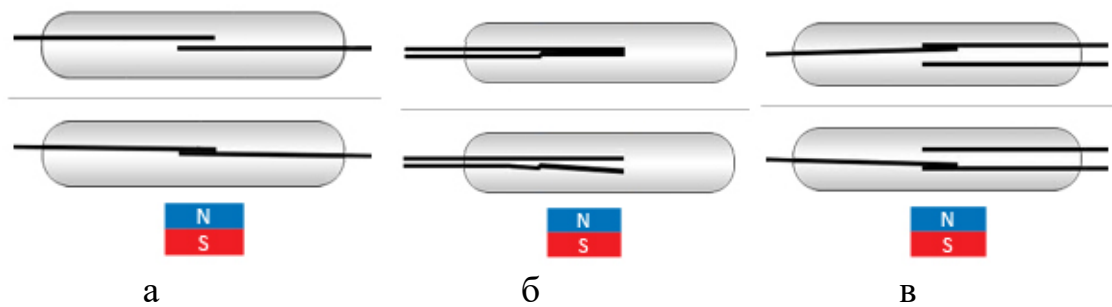


Рисунок 10.4 – Геркони: замикаючі (а), розмикаючі (б) та перемикаючі (в)

Реле витримки часу – виконують з пристроями уповільнення – електричними, механічними, пневматичними, гідравлічними. Для малих витримок часу (0,5 с) застосовують схемне рішення з R - L - C -ланцюгами.

Реле часу призначене для створення потрібної затримки, або декількох затримок у передаванні впливу між окремими вузлами автоматичних пристроїв, або від одного пристрою до іншого, шляхом формування незалежної витримки часу для забезпечення певної послідовності роботи елементів схеми. Реле часу використовується у випадках, коли потрібно автоматично виконувати якусь дію не одразу, після надходження сигналу керування, а за деякий заданий проміжок часу.

Реле часу поділяються на реле затримки, та програмовані реле. Програмовані реле бувають електромеханічні (добові або тижневі) та електронні (тижневі, місячні та річні – астрономічні).

За способом запуску розрізняють реле часу з електричним, гідравлічним, пневматичним та ручним керуванням.

За видом вихідного сигналу реле часу бувають електричні, пневматичні та гідравлічні.

За способом формування витримки є реле часу з електричним, пневматичним, магнітним, механічним, електромеханічним, термічним та гідравлічним сповільненнями.

Крокові шукачі – багатопозиційні перемикачі, що замінюють велику кількість реле (мають до 500 контактів). Кроковими їх називають тому, що щітки шукача переходять з контакта на контакт по черзі, крок за кроком.

Принцип роботи крокового шукача такий (рис. 10.5) Якщо за допомогою кнопки K подати живлення на електромагніт $ЕМ$, то він притягне якір $Я$, який заскочкою $З$ поверне храпове колесо $Х$ на один зуб і пересуне щітку $Щ$ на наступну пластину. Щоб щітка зробила ще один крок, потрібно відпустити кнопку K . і знову її натиснути.

Таким способом при кожному вмиканні й вимиканні електромагніту щітка пересовується з пластини на пластину. Часто замість кнопки джерелом імпульсів є контакти реле або пульс-пари.

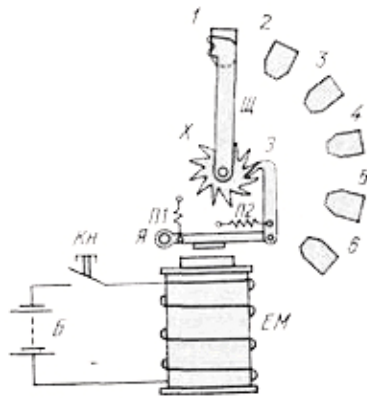


Рисунок 10.5 – Принцип роботи крокового шукача

10.2. Логічні схеми

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.

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

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

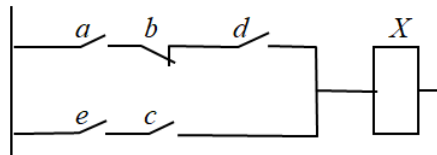


Рисунок 10.6 – Приклад схеми

В алгебрі логіки застосовують тільки дві математичні дії: „+” (паралельне з'єднання) та „ $\cdot$ ” (послідовне з'єднання).

В алгебрі логіки виділяють три основні логічні функції:

- логічне множення або кон'юнкція - (І). 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).

Алгебра логіки має такі 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:

$$a \cdot \bar{a} = 0$$

$$a + \bar{a} = 1$$

$$a \cdot 1 = a \quad a + 1 = 1$$

$$a \cdot 0 = 0 \quad a + 0 = a$$

$$a \cdot a \cdot a = a \quad a + a + a = a$$

$$a + a \cdot b = a(1 + b) = a \quad a(a + b) = a$$

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

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

10.3. 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.

- *багатотактні*

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 елементу 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.

Аналіз систем дискретної дії

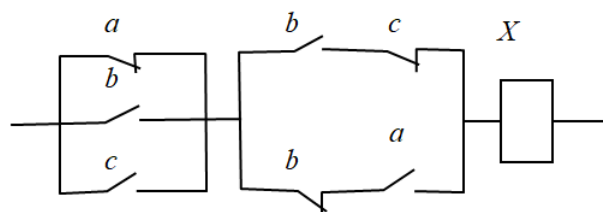
Полягає в мінімізації схем. Розрізняють такі способи:

- *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: Нехай є схема:



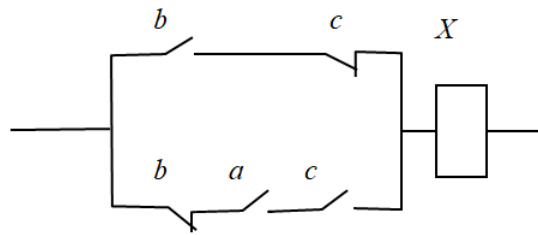
Запишемо рівняння для схеми і виконаємо перетворення у відповідності з правилами алгебри логіки:

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

Тоді маємо рівняння схеми:

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

і еквівалентну схему:



б) при графоаналітичному способі застосовують мінімізуючі 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.

Тема 11. Виконавчі елементи систем автоматики

11.1. Характеристики виконавчих пристроїв

Робоча характеристика

1) **Робоча** характеристика серводвигуна у разі обертального руху вихідної ланки є залежністю обертів двигуна n і корисного моменту M на валу двигуна від корисної потужності P цього двигуна. Робоча характеристика серводвигуна у разі поступального руху вихідної ланки є залежністю швидкості руху і тягового зусилля від корисної потужності P цього двигуна;

2) **Механічна** характеристика серводвигуна у разі обертального руху вихідної ланки визначає залежність обертів двигуна n від моменту M , що створюється ним, при різних значеннях параметра, що визначає його оберти, (наприклад, для електродвигуна від напруги живлення). У сімействі механічних характеристик двигуна ця величина є параметром.

Механічна характеристика серводвигуна у разі поступального руху вихідної ланки визначає залежність швидкості двигуна від корисного тягового зусилля, що створюється ним, при різних значеннях параметра, що визначає його швидкість. Наприклад, для гідроприводу – це значення швидкості двигуна залежно від корисного тягового зусилля, що створюється ним, при різних значеннях витрати робочої рідини.

3) **Регулювальна** характеристика серводвигуна у разі обертального руху вихідної ланки визначає залежність обертів, що розвиваються двигуном, від тієї величини, зміною якої визначають оберти цього двигуна.

Регулювальні характеристики двигуна також є сімейством кривих, в якому параметром є величина навантаження.

Регулювальною величиною наприклад, для електродвигунів може бути напруга, що подається на якор двигуна постійного струму, або струм його обмотки збудження, а навантаження характеризується опором, що підключається до електродвигуна R_n .

Регулювальна характеристика серводвигуна у разі поступального руху вихідної ланки визначає залежність швидкості, що розвивається двигуном, від тієї величини, зміною якої задають швидкість цього двигуна.

11.2. Електромагнітні виконавчі елементи (соленоїдні)

Особливість соленоїдних виконавчих механізмів полягає в тому, що необхідне для переміщення робочого органу зусилля створюється за рахунок електромагніту, що є невід'ємною частиною виконавчого механізму і забезпечує лише поступальний рух вихідної ланки.

Соленоїдні механізми застосовуються в основному в схемах двохпозиційного регулювання («Відкрито - Закрито»). Це пояснюється тим, що

регулюючий орган може знаходитися тільки в двох крайніх положеннях. Наприклад, перше – струм включений, осердя притягається і клапан

відкритий, друге – струм відключений, осердя відпущене (не притягає) і клапан закритий.

В залежності від умов застосування вони можуть бути:

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

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

Область застосування електромагнітів невелика через двопозиційний характер дії та малих габаритних 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).

11.3. Електромагнітні муфти

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

- **фрикційні** (сухого або в'язкого тертя);
- **індукційні**.

Керуюча дія муфт здійснюється за рахунок зміни їх зчеплення.

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 зчіплюючий 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 $M_n=1,7\ldots 20$ Нм.

11.4. Пневматичні та гідравлічні виконавчі механізми

Пневматичні та гідравлічні виконавчі механізми працюють на енергії стисненого повітря чи рідини. Вони відзначаються високою надійністю та простотою обслуговування, а також розвивають досить великі перестановочні зусилля.

Для підключення пневматичних ВМ до керуючих пристроїв з уніфікованими електричними вихідними сигналами необхідно використовувати спеціальні електро-пневмоперетворювачі для перетворення цих електричних сигналів в уніфікований пневматичний сигнал.

Перетворювачі перетворюють уніфіковані електричні сигнали 0...5, 0...20, 4...20 мА на тиск повітря 20...100 кПа. Принцип їхньої дії ґрунтується на методі силової компенсації, при якому момент, який розвивається котушкою, розташованою в полі постійного магніту, пропорційний вхідному сигналу, компенсується моментом сили, який розвивається сильфоном зворотного зв'язку. Елементом, який устатковує рівновагу моментів, є пневматична система «сопло-заслінка».

Найбільше розповсюдження отримали мембранні ВМ, у яких перестановочне зусилля хоча б в одному напрямку створюється тиском командного повітря, який змінюється в межах 20...100 кПа. Переміщення вихідного штока, з'єднаного з регулюючим органом, в одному напрямку створюється за рахунок тиску стисненого повітря в робочій порожнині на мембрану, в протилежному – за рахунок зворотної пружини (рис. 11.5). Переміщення штока пропорційне керуючому тиску. Зусилля, яке може створити мембранний ВМ, залежить від вибраного розміру мембрани.

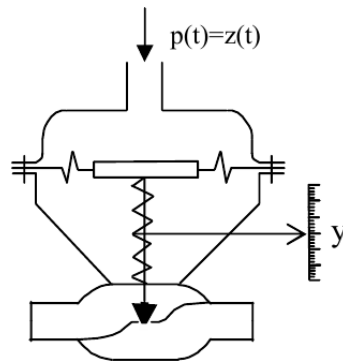


Рисунок 11.5 – Пневматичний мембранний ВМ

Поршневі виконавчі механізми типу ПСП – це механізми, в яких зусилля для зміни положення регулюючого органу створюється внаслідок зміни тиску робочого середовища у поршневих порожнинах. Виділяють два типи поршневих виконавчих механізмів. В одному переміщення робочого штоку в різні боки відбувається під дією тиску, який подається в одну або іншу порожнину (рис. 11.6). У другому переміщення штоку в один бік відбувається під дією тиску, а в інший – під дією зворотної пружини.

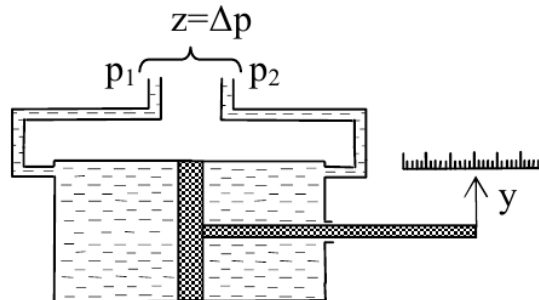


Рисунок 11.6 – Гідравлічний поршневий ВМ

Поршневі виконавчі механізми відрізняються від мембранних більшою величиною переміщення регулюючого органу та більшим зусиллям, яке він передає.

Поршневі поворотні пневматичні виконавчі механізми використовуються для поворотних регулюючих органів: заслінок і шарових кранів.

Тема 12. Автоматичні регулятори

12.1. Комбіновані регулятори та їх структури

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 $W_{зз}(s)=k_{зз}$. Ця схема має похибку, що визначається баластною аперіодичною ланкою з сталою часу

$$T_{бал} = T_{БМ} / k_{зз}$$

де $T_{БМ}$ – стала часу виконавчого механізму.

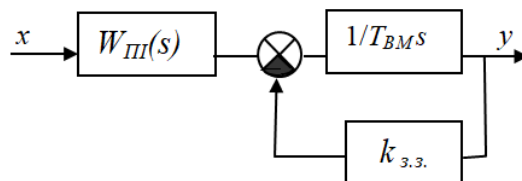


Рисунок 12.1 – Перша схема реалізації ПІ-регулятора

Але надмірне збільшення $k_{зз}$ 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 $ks/(Ts+1)$.

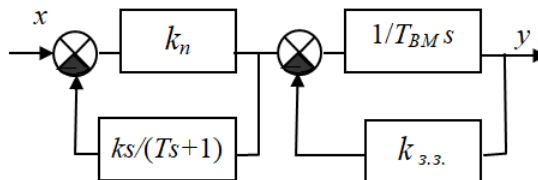


Рисунок 12.2 – Друга схема реалізації ПІ-регулятора

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

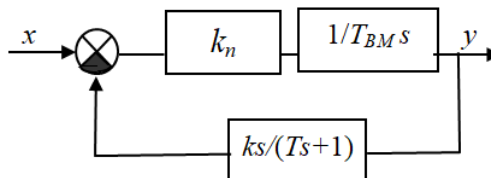


Рисунок 12.3 – Третя схема реалізації ПІ-регулятора

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

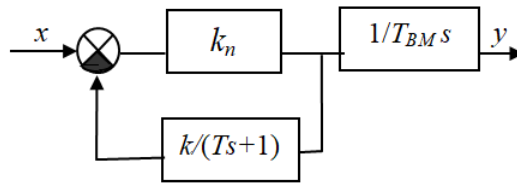


Рисунок 12.4 – Четверта схема реалізації ПІ-регулятора

$$W_{III}(s) = \frac{1}{W_{зз}(s) \cdot T_{BM}s}$$

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

$$W_{зз}(s) = \frac{1}{W_{III}(s) \cdot T_{BM}s} = \frac{Ts}{k_p(Ts+1)T_{BM}s} = \frac{k}{Ts+1}$$

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, оскільки пропорційна складова охоплює об'єкт зворотним зв'язком і складає ефект самовирівнювання.

Пропорційно-інтегрально-диференціальні 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.

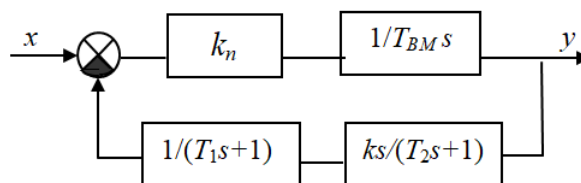


Рисунок 12.5 – Схема реалізації ПІД-регулятора

Список рекомендованої літератури

1. Теорія автоматичного керування: підручник / М. Г. Попович, О. В. Ковальчук. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К.: Либідь, 2007. – 656 с.
2. Корчемний М.О., Потапенко М.В. Теоретичні основи автоматики: навч. посібник / М.О. Корчемний, П.Б. Клендий, М.В. Потапенко. – Тернопіль: Навчальна книга – Богдан, 2012. – 304р.
3. Бахрушин В.Є. Теорія керування : навч. посіб. / В.Є. Бахрушин, Т.Ю. Огаренко. – Запоріжжя : КПУ, 2014. – 224 с.
4. Головка В.М.. Теоретичні основи автоматики (курс лекцій). Навч. посібник. – Ніжин: НАУ. 2004. – 104 с.
5. Ладанюк А.П. Теорія автоматичного керування: Курс лекцій для студентів напряму 0925 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології ден. та заочн. форм навчання – Ч.1 – К.: НУХТ, 2004.
6. Дерев’янчук А.Й., Кобяков О.М. Основи автоматики. Навчальний посібник. – Суми, 2003 – 142с
7. Кошкін Д.Л. Конспект лекцій з дисципліни "Теоретичні основи автоматики" / Д.Л.Кошкін.- Миколаїв, 2014 р.
8. Конспект лекцій з курсу “Теорія автоматичного керування” (для студентів 3 курсу денної і 4 курсу заочної форм навчання спеціальності 6.090603 “Електротехнічні системи електроспоживання”) / Авт.: Абраменко І.Г., Абраменко Д.І. - Харків: ХНАМГ, 2008.
9. Головка Д.Б.. Автоматика і автоматизація технологічних процесів. – К.: Либідь, 2007. – 232 с.
10. Валюх О. А., Максимів В. М. Елементи теорії автоматичного керування. – Львів, «Афіша», 2002. – 122 с.
11. Теория автоматического управления: конспект лекций / И.Г.Абраменко, Д.И. Абраменко. Под общ. редакцией И.Г.Абраменко. – Харьков: ХНАГХ, 2008. – 190 с.
12. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни "Теорія автоматичного управління" та "Основи автоматики та управління" для студентів усіх форм навчання за напрямами підготовки 6.050201 – “Системна інженерія”, 6.050202 – “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”, 6.050902 – “Радіоелектронні апарати” / Упоряд.: В.В. Усик, Я.Ю. Корольова. – Харків, ХНУРЕ, 2009.
13. Муляр Ю.І. Теорія автоматичного керування технологічними системами. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2005.

Кравченко Володимир
Олексійович
Вольвач Тетяна Сергіївна
Лисенко Віта Василівна

Теоретичні основи автоматики

Методичні вказівки до виконання самостійної роботи студентів

Суми, РВВ, Сумський національний аграрний університет,
вул.Г.Кондратьєва,160

Підписано до друку: _____ 2022 р. Формат А5: Гарнітура Times New Roman

Тираж: ____ примірників Замовлення _____ Ум. друк. арк.
