

Міністерство освіти і науки України
Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного

ЛОБОДА О. І., ТОДОРІКО О. М., ДУБІНІА С.В.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АВТОМАТИКИ

ПРАКТИКУМ

**для підготовки здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр»
зі спеціальності 141
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»**

**Мелітополь
2020**

Дозвіл до впровадження та видання надано Вченою радою факультету енергетики і комп'ютерних технологій Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного (протокол № 10 від "28" травня 2020 р.)

Укладачі:

Лобода Олександр Іванович, к.т.н., старший викладач кафедри електроенергетики і автоматизації, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного,

Тодоріко Олексій Максимович, викладач вищої категорії ВСП Новокаховський коледж ТДАТУ імені Дмитра Моторного,

Дубініна Світлана Вікторівна, асистент кафедри електроенергетики і автоматизації, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного.

Рецензенти:

Яковлев Валерій Федорович, к.т.н., професор кафедри енергетики та електротехнічних систем, Сумський національний аграрний університет

Вовк Олександр Юрійович, к.т.н., доцент кафедри "Електротехніка і електромеханіка імені професора В.В. Овчарова", Таврійський державний агротехнологічний університет

Лобода О. І.

Л68 Теоретичні основи автоматизації. Практикум: навчальне видання / О. І. Лобода, О. М. Тодоріко, С. В. Дубініна. – Мелітополь: ФОП Однорог Т. В., 2020. – 158 с.

ISBN 978-617-7823-23-9

Практикум з дисципліни "Теоретичні основи автоматизації" призначений для проведення практичних робіт на основі вивчення теоретичного матеріалу з курсу "Теоретичні основи автоматизації" для підготовки здобувачів ступеня вищої освіти "Бакалавр" зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та для викладачів при підготовці до практичних робіт.

В практикумі зібраний, систематизований та наочно викладений теоретичний і методичний матеріал, який охоплює практичні питання побудови і аналізу систем автоматичного керування.

© Лобода О. І.
© Тодоріко О. М.
© Дубініна С. В.
© Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, 2020

ЗМІСТ

Умовні скорочення.....	4
Вступ.....	5
Основні поняття та визначення систем автоматичного керування	6
Аналітичне визначення динамічних властивостей елементів і систем автоматичного керування	18
Основні принципи керування (регулювання) систем автоматичного керування.....	35
Частотні характеристики елементарних ланок систем автоматичного керування.....	50
Схеми систем автоматичного керування технологічного процесу	59
Математична будова моделі лінійної САК. Визначення загального рівняння руху системи автоматичного керування	74
Визначення стійкості системи автоматичного керування за критеріями стійкості.....	85
Визначення стійкості систем автоматичного керування за частотними критеріями	97
Визначення показників якості регулювання системи автоматичного керування по перехідним характеристикам.....	107
Визначення надійності систем автоматичного керування.....	115
Синтез систем автоматичного керування. Покращення показників якості регулювання	125
Методика розрахунку нелінійних систем автоматичного керування та усунення негативного впливу нелінійних елементів в САК	136
Список літератури.....	148
Вірні відповіді на тестові запитання	149
Додатки.....	150

УМОВНІ СКОРОЧЕННЯ

АКП – автоматизований керуючий пристрій
АФЧХ – амплітудно-фазо-частотна характеристика
АЧХ – амплітудно - частотна характеристика
ВП – виконавчий пристрій
ДЧХ - дійсна частотна характеристика
ЕП – елемент порівняння
ЗЗ – зворотний зв'язок
КЛ – коригувальна ланка
КП – керуючий пристрій
ЛАФЧХ – логарифмічна амплітудно-фазочастотна характеристика
ЛАХ – логарифмічна амплітудна характеристика
ЛЧХ – логарифмічна частотна характеристика
НЕ – нелінійний елемент
ОК – об'єкт керування
ПФ – передаточна функція
РП – регулюючий пристрій
САК - система автоматичного керування
САР – система автоматичного регулювання
ТП – технологічний процес
УЧХ – уявна частотна характеристика
ФЧХ – фазочастотна характеристика
ЧХ – частотна характеристика

ВСТУП

Випускник вищої школи повинен бути фахівцем, що має хорошу інженерну підготовку, і володіє не тільки основними, але й суміжними питаннями проектування і виробництва електронних засобів керування.

При проектуванні засобів автоматики і систем автоматичного керування важливе значення має знання області застосовності використовуваних методів і методик, їх зв'язку з класичними методами теорії автоматичного управління. Тому метою видання є розгляд практичних питань, які стосуються аналізу і синтезу автоматичних систем, що забезпечують вимоги, які ставляться в технічному завданні на конкретну систему.

Дисципліна "Теоретичні основи автоматики" належить до спеціальних профілюючих дисциплін та забезпечує формування у студентів на основі системного підходу особистісного світогляду, який дозволяє вільно орієнтуватись у теоретичних і практичних засадах реалізації і використання сучасних систем автоматики в технологічних процесах сучасного виробництва.

Практикум з "Теоретичних основ автоматики" призначений для проведення практичних робіт на основі вивчення теоретичного матеріалу з курсу "Теоретичні основи автоматики" для підготовки здобувачів ступеня вищої освіти "Бакалавр" зі спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" та для викладачів при підготовці до практичних робіт.

В практикумі зібраний, систематизований та наочно викладений теоретичний і методичний матеріал, який охоплює практичні питання побудови і аналізу систем автоматичного керування.

Структура кожної практичної роботи, їх зміст є методично обгрунтованими та роблять посібник зручним для самостійного опрацювання матеріалу студентами, як денної, так і заочної (дистанційної) форм навчання.

Під час підготовки навчального посібника максимально враховані та використані, як традиції та багаторічний досвід викладання дисципліни "Теоретичні основи автоматики" на кафедрі "Електроенергетика і автоматизація" ТДАТУ, так і тенденції досягнень і розвитку сучасних систем автоматичного керування в Україні.

ПРАКТИЧНА РОБОТА

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Мета заняття: вивчити і засвоїти основні поняття, що використовуються для систем автоматичного керування, і основні види автоматизації.

СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

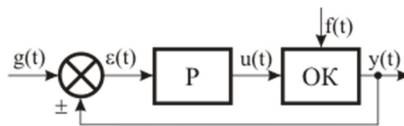
Для того, щоб технічна система могла виконувати необхідні операції в технологічному процесі, нею треба керувати, тобто здійснювати пуск, зупинення, змінювати режим роботи, положення робочих органів і виконувати інші операції керування і контролю шляхом дії на органи керування машин, механізмів. Якщо керування здійснюється людиною, воно називається *ручним*, якщо технічним засобом - *автоматичним*.

Людина, як ланка САК вважалася до недавнього часу здійсненою. Проте, успішне функціонування багатьох виробничих процесів, машин і складних пристроїв нині вимагає такої швидкодії і точності керування, які вже не під силу людині - операторові через обмеження його фізичних можливостей, таких як фізична сила, швидкість реакції, важкі навколишні умови: висока температура, наявність шкідливих випромінювань та інше. Ось деякі серйозні причини, що характеризують людину, як слабку ланку в системі керування.

1. *Запізнювання реакції людини в середньому складає 0,3 секунди і практично виключає ручне керування у високошвидкісних пристроях. Так при керуванні пристроєм в прокатних станах при швидкості виходу прокату 10...30 м/с, час, який потрібен операторові для виявлення відшаровування товщини смуги від заданої, занадто великий, щоб впливати на відповідні коригуючі пристрої.*

2. *При тривалому, навіть не дуже складному алгоритмі керування, фізична втома оператора значно знижує якість роботи системи в цілому, а часто призводить до її відмови в роботі.*

Для здійснення автоматичного керування технологічним процесом створюється система, що включає керований об'єкт і керуючий пристрій, або автоматичний регулятор, що складається із засобів автоматики і телемеханіки (рис. 1).



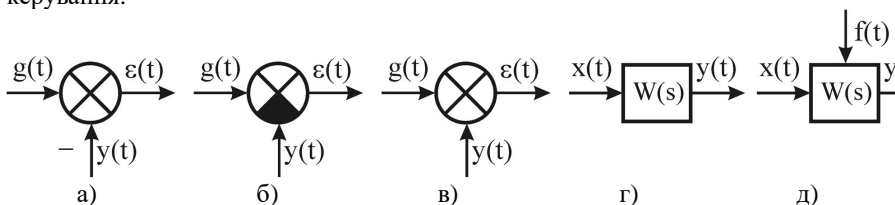
P – регулятор; ОК – об'єкт керування; $g(t)$ – задаючий вплив; $\epsilon(t)$ – похибка; $u(t)$ – проміжний сигнал; $f(t)$ – збурюючий вплив; $y(t)$ – вихідний сигнал

Рисунок 1 – Система автоматичного керування в загальному вигляді

1. Основні поняття систем автоматизації

Елемент автоматики - це частина пристрою автоматичної системи, яка виконує самостійні функції в якісних або кількісних перетвореннях фізичних величин.

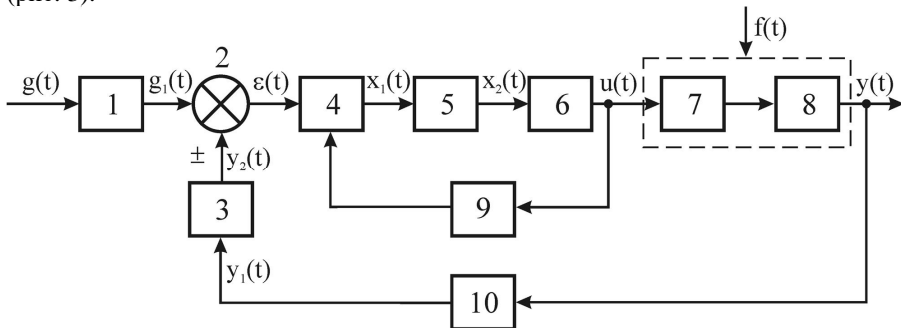
Точка автоматичної системи або пристрою, до якої прикладена якась дія, має назву *входу* $x(t)$ (рис. 2 г, д), а точка, в якій спостерігаємо ефект, викликаний даною дією має назву – *виходу* $y(t)$, $f(t)$ має назву *зовнішньої дії*, тобто дії зовнішнього середовища, а під внутрішньою дією розуміється дія однієї частини автоматичної системи на іншу в системі автоматичного керування. За збурюючі дії приймають такі дії, які не передбачені алгоритмом керування. На практиці збурююча дія погіршує роботу системи автоматичного керування.



- а), б) порівнюючий елемент з від'ємним зв'язком; в) порівнюючий елемент з додатним зв'язком; г) елемент автоматики без збурюючої дії;
- д) елемент автоматики із зовнішньою збурюючою дією $f(t)$

Рисунок 2 – Основні елементи автоматики

Прості і складні засоби автоматики складаються із окремих пов'язаних між собою елементів, які можна представити у вигляді структурної схеми (рис. 3).



- 1 - задаючий елемент; 2 - порівнюючий елемент; 3 - вимірювальний (чутливий) елемент; 4 - перетворюючий елемент; 5 - підсилювальний елемент;
- 6 - виконавчий елемент; 7 – робочий орган; 8 - об'єкт керування;
- 9 - місцевий зворотний зв'язок; 10 - головний зворотний зв'язок

Рисунок 3 - Система автоматичного керування в розгорнутому виді

Представимо найбільш загальний випадок побудови систем автоматичного керування, що має максимум елементів.

Задаючий елемент (1) формує задаючу дію $g(t)$, яка визначає необхідне значення керованої величини, і перетворює її в однозначно відповідну величину $g_1(t)$, зручну для порівняння з величиною $y_2(t)$.

Як задаючі елементи можуть використовуватися різні кулачкові механізми, функціональні потенціометри, перфокарти, магнітні плівки, профільні діаграми та інше. Іноді задаючий елемент конструктивно об'єднується в одне ціле з вимірювальним і порівнюючим елементом.

Порівнюючий елемент (2) у найбільш поширеному виді вимірює різницю сигналів (помилку) $e(t) = g_1(t) \pm y_2(t)$. В порівнюючих елементах може відбуватися і підсумовування сигналів. Операції алгебраїчного підсумовування на схемах автоматики позначаються умовними знаками (рис. 3) "+" або "-". В якості порівнюючих елементів можуть використовуватися потенціометри, механічні диференціали і сельсини пари в трансформаторному режимі для порівняння кутових переміщень, пристрої на резисторах для порівняння і підсумовування електричних напруг, струмів та інші.

Вимірювальний (чутливий) елемент (3), вимірює дійсне значення керованої величини $y_1(t)$ і перетворює її в однозначно відповідну величину $y_2(t)$, зручну для порівняння із задаючою величиною $g_1(t)$. Якщо чутливий елемент створює електричний або пневматичний сигнал, то він має назву *первинного перетворювача*.

Перетворюючий елемент (4) призначений для перетворення сигналів в зручний вид і іноді об'єднується в одне ціле з датчиком або іншим елементом для подальшого використання.

Підсилювальний елемент (5) посилює сигнал розузгодження $x_1(t)$ до величини, достатньої для приведення в дію виконавчого елемента $x_2(t)$. В підсилювальному елементі відбувається збільшення сигналу за рахунок отримання енергії ззовні. В системах автоматичного керування найчастіше використовуються електричні (електронні, релейні, електромагнітні, магнітні, напівпровідникові та ін.), гідравлічні та пневматичні підсилювачі. Останні мають високий коефіцієнт підсилення по потужності і виконують одночасно роль виконавчих елементів (серводвигунів, сервомеханізмів).

Виконавчий елемент (6) виробляє і подає на регулюючий орган об'єкту керування керуючу дію $u(t)$. По виду використовуваної енергії виконавчі елементи поділяють на електричні (електродвигуни постійного і змінного струму, однооборотні і багатооборотні електричні виконавчі механізми та інші), гідравлічні і пневматичні (серводвигуни, що характеризуються великим підсиленням, швидкодією і високою точністю).

Об'єкти керування (8) - це різноманітні технічні пристрої, енергетичні і силові установки, транспортні засоби, окремі механізми пристроїв та інше.

Коригуючі елементи (9) або *місцевий зворотний зв'язок* - це спеціальні пристрої, що вводяться в систему для покращення якості керування.

Головний зворотний зв'язок (10) - це зв'язок між виходом системи і входом, що створює замкнутий контур керування.

На об'єкт керування крім керуючої вхідної дії $u(t)$ впливають і різні зовнішні збурюючі дії $f(t)$, або збурення (рис. 3), що викликають зміну керованої або регульованої величини $y(t)$ (вихідна величина).

Збурюючі і задаючі дії поділяються на *зовнішні* і *внутрішні*. *Зовнішні* - це дії на автоматичну систему зовнішнього середовища або пристрою, що не є частиною цієї системи. *Внутрішні* - це впливи однієї частини системи на іншу.

Для боротьби зі збуреннями об'єкт забезпечується *регулюючим органом* (7), впливаючи на який вручну або автоматично, можна змінювати керовану величину, компенсуючи небажані зміни, викликані впливом збурень.

Автоматичний керуючий пристрій - пристрій, що здійснює дію на керований об'єкт відповідно до алгоритму керування.

Автоматична система - сукупність об'єкту керування і керуючого пристрою (рис. 1), які взаємодіють між собою для досягнення заданої мети керування.

Алгоритм керування - це сукупність приписів, що визначають характер керованих дій на об'єкт з метою здійснення ним заданого алгоритму функціонування з урахуванням динамічних властивостей системи.

Алгоритм функціонування - це сукупність правил, приписів або математичних залежностей, що визначають правильне виконання технологічного процесу в будь-якому пристрої. Він складається на підставі технологічних, економічних і інших вимог без урахування динамічних спотворень.

Амплітудна частотна характеристика (АЧХ) - графік, що характеризує посилення або послаблення вхідних гармонійних сигналів різної фіксованої частоти в сталому режимі.

Астатична автоматична система - система, в якій при постійній задаючій або збурюючій дії встановлюється нульова помилка, незалежна від величини цієї дії.

Безперервні автоматичні системи - системи, в яких в усіх елементах керуючого пристрою вхідні і вихідні сигнали є безперервними функціями часу.

Безперервні лінійні автоматичні системи - безперервні автоматичні системи, процеси в яких описуються лінійними законами (лінійними диференціальними рівняннями).

Безперервні стаціонарні автоматичні системи - безперервні системи з постійними в часі конструктивними параметрами. *Дія* - будь-який чинник, що призводить до зміни стану об'єкта керування або будь-якого елемента пристрою (сила, момент, напруга і таке інше), що управляє.

Дискримінатор автоматичної системи - пристрій, призначений для виявлення розузгодження сигналів в системі (вимірник розузгодження).

Дискримінаційна характеристика автоматичної системи - залежність математичного очікування вихідної напруги дискримінатора від помилки стеження при постійних значеннях амплітуди вхідного сигналу і спектральної щільності вхідного шуму.

Запас стійкості автоматичної системи по амплітуді – величина АЧХ (ЛЧХ) у відносних одиницях (дБ), яка показує на скільки треба змінити коефіцієнт передачі системи при незмінних фазових співвідношеннях, щоб привести її до межі стійкості.

Запас стійкості автоматичної системи по фазі – величина кута різниці фаз в градусах, яка показує на скільки повинно зрости негативне зрушення по фазі (запізнювання по фазі) в системі на частоті зрізу при незмінному значенні коефіцієнта передачі, щоб система виявилася на межі області стійкості (вихідний і вхідний сигнали знаходилися б у протифазі).

Керованим об'єктом називають пристрій, який безпосередньо здійснює технологічний процес, що потребує чинення спеціально організованих дій ззовні для виконання його алгоритму.

Критерії стійкості автоматичної системи – математично сформульовані правила, що дозволяють досліджувати стійкість системи без обчислення коренів характеристичного рівняння.

Логарифмічна амплітудна характеристика (ЛАХ) – представлення АЧХ в логарифмічному масштабі.

Мінімальна - фазова автоматична система - система, усі нулі й полюси якої мають негативні або рівні нулю речові частини.

Модель автоматичної системи – математичне (графічне) представлення процесів, що протікають в системі.

Нуль автоматичної системи – корінь характеристичного рівняння, представленого прирівняним до нуля чисельником передаточної функції розімкненої системи.

Передаточна функція автоматичної системи – відношення зображень по Лапласу вихідної величини автоматичної системи до вхідної за нульовими початковими умовами.

Передаточна частотна функція автоматичної системи (амплітуда – фазо-частотна характеристика (АФЧХ), комплексний коефіцієнт передачі) – функція, що визначає реакцію системи на гармонійні дії при нульових початкових умовах.

Перерегулювання – відношення максимального відхилення керованої величини від сталого значення, до цього сталого значення, вираженого у відсотках.

Перехідна імпульсна або вагова функція автоматичної системи – функція $w(t)$, що визначає реакцію системи на одиничну імпульсну дію $d(t)$ за нульовими початковими умовами.

Перехідна функція (характеристика) автоматичної системи - функція $h(t)$ (її графічне представлення), що визначає реакцію системи на одиничну стрибкоподібну дію $l(t)$ за нульовими початковими умовами.

Полюс автоматичної системи – корінь характеристичного рівняння, представленого прирівняним до нуля знаменником передаточної функції розімкненої системи.

Порядок астатизму автоматичної системи – параметр автоматичної системи, що характеризує її властивості як астатичної системи, і визначений

структурною схемою автоматичної системи. При ступінчастому вхідному сигналі порядок астатизму замкненої автоматичної системи дорівнює числу інтегруючих ланок у відповідному колі зворотного зв'язку.

Принцип розімкненого керування – така організація керування, коли відсутній зв'язок між виходом об'єкту керування і керуючим пристроєм.

Принцип замкненого керування – така організація керування, коли керуючий пристрій пов'язаний з виходом об'єкту керування (негативний або позитивний зворотний зв'язок).

Програмне керування – це алгоритм функціонування, при якому вихідна величина об'єкту змінюється за заздалегідь заданою програмою. Розрізняють системи з часовим і просторовим програмним керуванням ("штучний світанок", системи з програмним керуванням).

Речова частотна характеристика (РЧХ) – проекція амплітудно-фазової характеристики системи на речову вісь в прямокутній системі координат на комплексній площині.

Синтез автоматичної системи – визначення структури і параметрів системи за заданими вимогами до якості процесу керування.

Система автоматичного керування (САК) – це система, що виконує деяку мету за допомогою переробки і перетворення доступної інформації про внутрішні і зовнішні умови своєї роботи у вектор \vec{Y} і забезпечує необхідний функціональний зв'язок між вектором \vec{Y} і вектором стану \vec{X} .

Система автоматичного регулювання (САР) – це система, що служить для забезпечення необхідного функціонального зв'язку між векторами \vec{Y} і \vec{X} за допомогою їх порівняння. Згідно з цим, САР розглядається як складова частина більш широкого поняття САК.

Спектральна характеристика автоматичної системи (флуктуаційна) – залежність спектральної щільності вихідного сигналу від помилки стеження (при фіксованих значеннях амплітуди вхідного сигналу і спектральної щільності вхідного шуму).

Статична автоматична система – система, в якій при постійній задаючій або збурюючій дії встановлюється помилка, незалежна від величини цієї дії.

Стійкість автоматичної системи – властивість системи забезпечити скільки завгодно мале відхилення збуреного руху при досить малих початкових збуреннях за кінцевий відрізок часу.

Структурно-динамічна схема автоматичної системи (СДС) - умовне графічне зображення системи, що показує з яких динамічних ланок вона складається, і як ці ланки з'єднані між собою.

Типові дії автоматичної системи – дії, що відбивають найбільш суттєві сторони реальних вхідних сигналів і математично описувані порівняно простими функціями часу.

Типові динамічні ланки – елементарні ланки, що описуються звичайними лінійними алгебраїчними рівняннями або диференціальними рівняннями зв'язку не вище другого порядку з позитивними постійними коефіцієнтами.

Тотожне структурне перетворення - перестановка елементів структурно-динамічної схеми автоматичної системи, що забезпечує отримання одноконтурної схеми, яка еквівалентна початковій багатоконтурній (усі вхідні і вихідні величини початкової і перетвореної ділянок схеми залишаються незмінними).

Уявна частотна характеристика (УЧХ) - проекція амплітудно-фазової характеристики системи на уявну вісь в прямокутній системі координат на комплексній площині.

Фазова частотна характеристика (ФЧХ) - графік, що характеризує зрушення по фазі гармонійних вихідних сигналів відносно вхідних різної фіксованої частоти в сталому режимі.

Характеристичне рівняння системи - рівняння, що отримується прирівнюванням до нуля чисельника або знаменника передаточної функції системи (характеристичного багаточлена диференціального рівняння). Відповідно, виходить характеристичне рівняння розімкненої або замкнутої системи.

Частота зрізу - частота коливань вхідного гармонійного сигналу, при якій АЧХ системи дорівнює одиниці (точка переходу ЛЧХ через вісь частот).

Частота сполучення - частота, на якій відбувається сполучення низькочастотної і високочастотної асимптотичних складових ЛАХ.

Час регулювання - час, за який перехідний процес практично закінчується.

Число коливань за час регулювання - кількість коливань керованої величини за час перехідного процесу біля її значення, що встановилося.

Якість автоматичної системи - характеристика поведінки системи в сталому стані і перехідному процесі при певному виді зовнішніх дій.

2. Основні види автоматизації

Залежно від функцій, які виконуються спеціальними автоматичними пристроями, розрізняють наступні основні види автоматизації (рис. 4):

1. *Автоматичний контроль*, до якого, в свою чергу, входять:

а) *автоматична сигналізація* - призначена для оповіщення персоналу про наявність, характер і місце порушення або досягнення граничних значень параметрів технологічного процесу (ТП). До сигнальних пристроїв відносяться лампи, дзвінки, сирени, спеціальні мнемонічні покажчики та інше.

б) *автоматичне вимірювання* - дозволяє вимірювати і передавати на спеціальні прилади значення контрольованих параметрів ТП і режимів роботи машин і агрегатів.

в) *автоматичне сортування* - здійснює ідентифікацію та розподіл продукції за фізико-механічними ознаками: розміром, вагою, твердістю, зрілістю (сортування зерна, картоплі, кавунів та інше).

г) *автоматичний збір інформації* – дозволяє отримувати інформацію про хід ТП, види, кількість і якість продукції, що випускається, та інше.

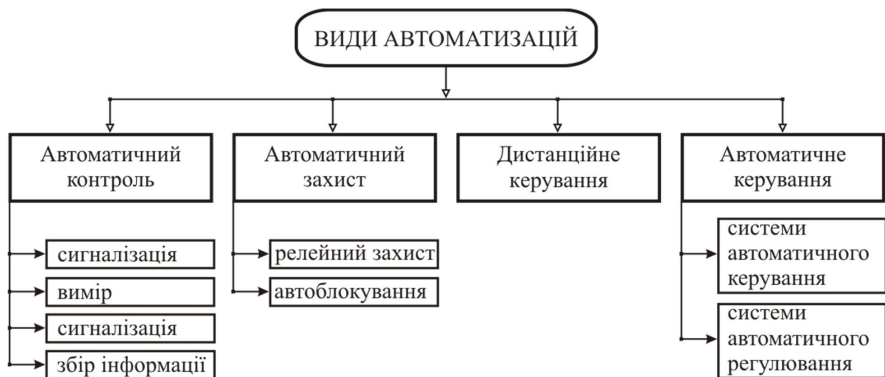


Рисунок 4 - Основні види автоматизації

2. *Автоматичний захист* - це сукупність технічних засобів, що реагують на аномальні і аварійні режими протікання ТП з подальшим його відключенням, або припиненням, або автоматичним усуненням несправностей. Наприклад: релейний захист, електричні блокування і автоблокування в технологічних лініях.

3. *Дистанційне керування* включає в себе методи і технічні засоби керування об'єктами на відстані тобто це комплекс технічних засобів і методів керування об'єктами без участі оператора на ТП.

4. *Автоматичне керування* включає в себе комплекс технічних засобів і методів керування об'єктами без участі обслуговуючого персоналу:

- пуск і зупинення основних установок;
- вмикання або вимикання допоміжних пристроїв;
- забезпечення безаварійної роботи;
- дотримання необхідних значень параметрів відповідно до оптимального проведення технологічного процесу.

За ступенем автоматизації розрізняють наступні її види:

- часткову - охоплення окремих виробничих операцій або установок, які не звільняють оператора від участі в ТП, але полегшують його працю (роздача кормів на фермі);
- комплексну - автоматичне виконання всіх операцій за участю оператора;
- повну - на відміну від комплексної - без участі оператора при виборі та узгодженні режимів роботи ліній. Оператор лише стежить і перебудовує на нові виробничі завдання.

ЗАВДАННЯ ДО САМОСТІЙНОЇ ДОМАШНЬОЇ ПІДГОТОВКИ

1. Відновити знання по історії розвитку автоматики, як науки.
2. Відновити знання з курсу вищої математики – рішення диференціальних рівнянь, перетворення Лапласу і матрична алгебра.

3. Відповіді на контрольні запитання.

ПРОГРАМА ЗАНЯТТЯ

1. Вивчення основних теоретичних відомостей до практичного заняття.
2. Проведення поточного тематичного тестування за темою заняття.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке нулі і полюси характеристичного рівняння САК?
2. Як визначаються нулі і полюси характеристичного рівняння САК?
3. Які типові впливи використовуються для визначення динамічних властивостей САК?
4. Якими формами описуються динамічні властивості елементів САК?
5. З яких основних елементів складається структурна схема автоматизації в загальному вигляді?
6. З якою метою проводять синтез систем автоматичного керування?
7. Від чого залежить порядок астатизму САК?
8. Що таке "мінімально - фазова автоматична система"?
9. Що таке "типова динамічна ланка"?
10. Для чого використовується тотожне структурне перетворення схем автоматизації?
11. Що таке і як визначається речова (уявна) частотна характеристика елемента (системи) автоматичного керування?
12. Що таке задаючий (збурюючий) вплив САК?
13. Що таке і як визначається помилка в САК?

ТЕСТОВИЙ КОНТРОЛЬ ЗНАЬ №1

Питання № 1

Встановити відповідність для понять автоматики

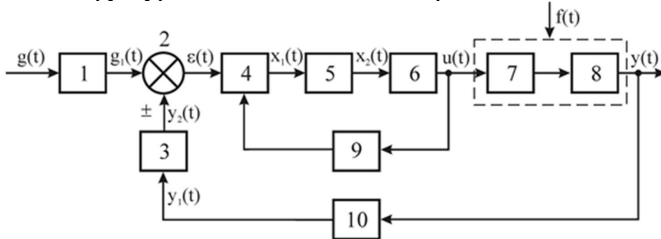
а	точка автоматичної системи або пристрою, до якої прикладена будь-яка дія	1	має назву - виходу $y(t)$
б	дія зовнішнього середовища	2	це дія однієї частини автоматичної системи на іншу
в	точка, в якій спостерігаємо ефект, викликаний даною дією	3	дія, яка не передбачена алгоритмом керування
г	внутрішня дія	4	має назву зовнішньої дії
д	збурююча дія	5	має назву входу $x(t)$

- 1) а-2; б-4; в-1; г-5; д-3
- 3) а-4; б-5; в-1; г-3; д-2

- 2) а-5; б-4; в-2; г-1; д-3
- 4) а-5; б-4; в-1; г-2; д-3

Питання № 2

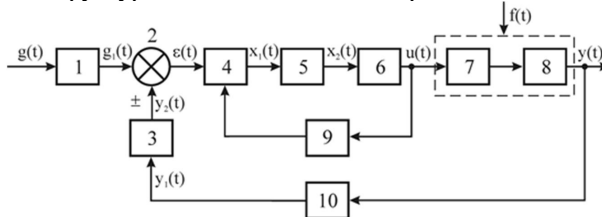
На поз. 4 структурної схеми автоматики представлено елемент -



- 1) виконавчий елемент
- 2) задаючий елемент
- 3) перетворюючий елемент
- 4) місцевий зворотний зв'язок

Питання № 3

На поз. 9 структурної схеми автоматики представлено елемент -



- 1) робочий орган;
зв'язок;
- 2) місцевий зворотний зв'язок;
- 3) порівнюючий елемент;
- 4) виконавчий елемент;

Питання № 4

Дати визначення поняття. Типові дії автоматичної системи це ...

- 1) дії, що відбивають найбільш суттєві сторони реальних вхідних сигналів і математично описувані порівняно простими функціями часу;
- 2) така організація керування, коли відсутній зв'язок між виходом об'єкту керування і керуючим пристроєм;
- 3) така організація керування, коли пристрій, що керує, пов'язаний з виходом об'єкту керування (від'ємний і додатний зворотний зв'язок);
- 4) відношення зображень по Лапласу вихідної величини автоматичної системи до вхідної за нульовими початковими умовами.

Питання № 5

Дати визначення поняття. Нуль автоматичної системи це -

- 1) система, в якій при постійній задаючій або збурюючій дії встановлюється нульова помилка, незалежна від величини цієї дії;
- 2) корінь характеристичного рівняння, представленого прирівняним до нуля знаменником передаточної функції розімкненої системи;
- 3) корінь характеристичного рівняння, представленого прирівняним до нуля чисельником передаточної функції розімкненої системи;

4) система, в якій при постійній задаючій або збурюючій дії встановлюється помилка, залежна від величини цієї дії.

Питання № 6

Дати визначення поняття. Астатична автоматична система це - ...

- 1) система, в якій при постійній задаючій або збурюючій дії встановлюється нульова помилка, незалежна від величини цієї дії;
- 2) корінь характеристичного рівняння, представленого прирівняним до нуля знаменником передаточної функції розімкненої системи;
- 3) корінь характеристичного рівняння, представленого прирівняним до нуля чисельником передаточної функції розімкненої системи;
- 4) система, в якій при постійній задаючій або збурюючій дії встановлюється помилка, залежна від величини цієї дії.

Питання № 7

Дати визначення поняття. Характеристичне рівняння системи це - ...

- 1) система рівнянь з чисельника і знаменника передаточної функції замкненої системи автоматичного керування;
- 2) сума чисельника і знаменника передаточної функції системи автоматичного керування;
- 3) рівняння, що отримується прирівнюванням до нуля чисельника або знаменника передаточної функції;
- 4) система рівнянь з чисельника і знаменника передаточної функції розімкнутої системи автоматичного керування.

Питання № 8

Дати визначення поняття. Безперервні автоматичні системи - це ...

- 1) математичне (графічне) представлення системи і процесів, що протікають в ній;
- 2) системи з постійними в часі конструктивними параметрами;
- 3) автоматичні системи, процеси в яких описуються лінійними законами (лінійними диференціальними рівняннями);
- 4) системи, в яких в усіх елементах керуючого пристрою вхідні і вихідні сигнали є безперервними функціями часу.

Питання № 9

Дати визначення поняття. Частота зрізу це ...

- 1) перестановка елементів структурно-динамічної схеми автоматичної системи, що забезпечує отримання одноконтурної схеми, яка еквівалентна початковій багатоконтурній (усі вхідні і вихідні величини початкової і перетвореної ділянок схеми залишаються незмінними);
- 2) частота коливань вхідного гармонійного сигналу, при якій АЧХ системи дорівнює одиниці (точка переходу ЛЧХ через вісь частот);
- 3) характеристика поведінки системи в сталому стані і перехідному процесі при певному виді зовнішніх дій;

4) умовне графічне зображення системи, що показує з яких динамічних ланок вона складається і як ці ланки з'єднані між собою.

Питання № 10

Дати визначення поняття. Спектральна характеристика автоматичної системи (флуктуаційна) це ...

- 1) залежність математичного очікування вихідної напруги дискримінатора від помилки стеження при постійних амплітуді вхідного сигналу і спектральній щільності вхідного шуму;
- 2) залежність спектральної щільності вихідного сигналу від помилки стеження (при фіксованих значеннях амплітуди вхідного сигналу і спектральної щільності вхідного шуму);
- 3) визначення структури і параметрів системи за заданими вимогами до якості процесу керування;
- 4) пристрій, призначений для виявлення розузгодженості сигналів в системі (вимірник розузгодженості).

ПРАКТИЧНА РОБОТА

АНАЛІТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ І СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Мета заняття: придбати практичні навички в визначенні динамічних властивостей елементів і систем автоматичного керування

СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1. Загальні поняття

Будь-яка система автоматичного керування працює у двох режимах: статичному й динамічному. Поведінка ланки або системи в статичному режимі визначається по статичній характеристиці, яка може бути отримана експериментально або теоретично. По статичній характеристиці для кожного значення вхідної величини ланки "x" можна визначити відповідне стале значення вихідної величини "y".

Для зручності систему керування розбивають на так звані динамічні ланки. Стан будь-якої динамічної ланки може бути охарактеризовано як сукупність відповідних фізичних параметрів. На практиці існують різні способи опису динамічних властивостей як окремих ланок, так і системи автоматичного керування в цілому. Частіше використовують диференціальні рівняння, передаточні функції, часові й частотні характеристики.

При складанні диференціальних рівнянь параметри всіх елементів лінійних ланок приймають незалежними від часу. Чим складніше ланка, тим вище порядок його диференціального рівняння.

Як приклад розглянемо диференціальне рівняння руху елементарної ланки 2-го порядку в перехідному процесі:

$$T_2^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_1 \frac{dy}{dt} + y = kx, \quad (1)$$

де x і y – відхилення вхідного впливу й вихідної величини елементарної ланки від

стану рівноваги;

T_1, T_2 – постійні коефіцієнти (постійні часу);

k – коефіцієнт підсилення (передачі) елементарної ланки (системи).

У зв'язку з тим що стан динамічної ланки може бути охарактеризовано сукупністю відповідних фізичних величин (швидкість переміщення, напруга, струм, тиск та інше), а розмірності цих величин різні, то їх представляють узагальненими координатами. Порядок складання диференціальних рівнянь полягає в наступному:

1. Визначається вхідна та вихідна величини, а також діючі на них фактори.
2. Обирається початок відліку системи.

3. Виявляється і використовується основний фізичний закон, що визначає зв'язок між вхідною і вихідною величинами (наприклад, для механіки – закон Ньютона, Гаука; для електротехніки – закон Кірхгофа, Ома та інші).

Математичний опис фізичного закону, зв'язки між вхідною і вихідною величинами у динамічному стані і є вихідним диференціальним рівнянням.

В теорії автоматичного керування крім диференціальних рівнянь знайшли широке застосування так звані передаточні функції.

Опис автоматичних систем істотно спрощується при використуванні методів операційного числення. Використовуючи перетворення Лапласа, лінійне диференціальне рівняння приводять до рівняння алгебри з комплексними змінними. Перетворенням Лапласа називають співвідношення:

$$X(s) = \int_0^{\infty} x(t)e^{-st} dt, \quad (2)$$

яке функцію $x(t)$ дійсної змінної ставить у відповідність функції $X(s)$ комплексної змінної s , де $s = a + jb$.

Функція $x(t)$ має назву оригіналу, а $X(s)$ - зображення за Лапласом. Перетворення Лапласа можна застосувати до функції $x(t)$, якщо вона має кінцеве число розривів, дорівнює нулю при $t < 0$ і обмежена по модулю при $t > 0$.

Перетворення Лапласа можна записати в символній формі:

$$X(s) = L\{x(t)\},$$

де L - оператор Лапласа.

Припустимо, що властивості автоматичної системи описуються диференціальним рівнянням виду:

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 = b_m \frac{d^m y(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} y(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_0 \quad (3)$$

де $x(t)$ - вхідна дія,

$y(t)$ - реакція системи (вихідний процес),

a і b - постійні коефіцієнти.

Використовуючи перетворення Лапласа до цього рівняння, отримуємо лінійне алгебраїчне рівняння відносно $Y(s)$.

$$a_n s^n Y(s) + a_{n-1} s^{n-1} Y(s) + \dots + a_0 = b_m s^m X(s) + b_{m-1} s^{m-1} X(s) + \dots + b_0 \quad (4)$$

або

$$Y(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0} X(s) \quad (5)$$

Вираз

$$W(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0} = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (6)$$

визначає передаточну функцію автоматичної системи.

Передаточною функцією ланки по якому-небудь зовнішньому впливу називається відношення перетворення Лапласа вихідної величини ланки до

перетворення Лапласа розглянутого зовнішнього впливу при нульових початкових умовах.

З (6) видно, що зображення реакції визначається передаточною функцією і зображенням вхідної дії:

$$Y(s) = W(s)X(s)$$

звідки слідує друге визначення передаточної функції.

Передаточною функцією системи називається функція, що зв'язує зображення по Лапласу її реакції із зображенням по Лапласу вхідної дії за нульових початкових умов.

Передаточну функцію можна отримати безпосередньо по диференціальному рівнянню шляхом формальної заміни оператора диференціювання - комплексної змінної "s", а функцій часу x(t), y(t) - їх зображеннями X(s), Y(s). Якщо динамічна ланка або автоматична система має декілька входів, то по кожному з них складають передаточну функцію, зважаючи на принцип суперпозиції.

Передаточні функції лінійних динамічних ланок є дробово-раціональними функціями комплексної змінної "s" з постійними коефіцієнтами, залежними від параметрів системи. Для систем, що описуються передаточною функцією з m £ n, є правильною дробово-раціональною функцією "s". Багаточлен, що фігурує в знаменнику передаточної функції, називається *характеристичним поліномом*, а рівняння виду:

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

має назву *характеристичного рівняння*.

Практично перехід від диференціального рівняння до передаточної функції можна виконати без будь-яких обчислень, а формальною заміною $\frac{d^n}{dt^n}$ на s^n , а функцій x(t) і y(t) - їх зображеннями X(s) і Y(s), тому диференціальне рівняння (1) прийме вигляд:

$$(T_2^2 s^2 + T_1 s + 1)Y(s) = kX(s) \quad (7)$$

А передаточна функція прийме вигляд:

$$W(s) = \frac{k}{T_2^2 s^2 + T_1 s + 1} \quad (8)$$

Особливі точки передаточної функції

Полюсами передаточної функції називають ті значення комплексної змінної "s", при яких передаточна функція дорівнює нескінченності. Для знаходження полюсів досить знайти корені характеристичного рівняння.

Нулями передаточної функції називають ті значення комплексної змінної "s" при яких передаточна функція дорівнює нулю. Для знаходження нулів досить знайти корені багаточлена, розташованого в чисельнику передаточної функції.

Розподіл нулів/полюсів зазвичай зображують в графічному виді. Для цього будують s- площину з системою координат, де по горизонтальній осі відкладають значення Re(s), а по вертикальній - Im(s). Приклад такого графіку

наведений на рис. 1. Тут нулі показані кружечками, а полюси - хрестиками. Називатимемо нулі і полюси лівими (правими), якщо вони розташовані в лівій (правій) частині комплексної s - площини і нейтральними або нульовими, якщо вони лежать на уявній осі або, відповідно, на початку координат.

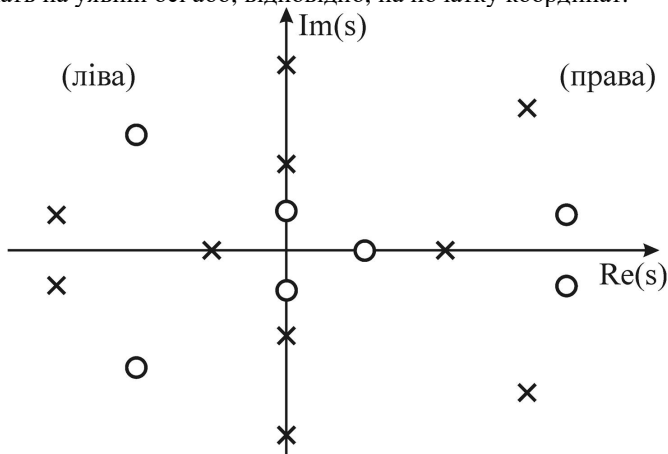


Рисунок 1 - Графік розподілу нулів / полюсів

Введемо наступні показники передаточної функції $W(s)$:

- 1) порядок n , рівний мірі знаменника передаточної функції $W(s)$;
- 2) степінь $p - m$, рівний різниці степенів знаменника і чисельника передаточної функції $W(s)$;
- 3) індекс аперіодичної нейтральності, рівний числу нульових полюсів передаточної функції $W(s)$;
- 4) індекс коливальної нейтральності, рівний числу уявних полюсів передаточної функції $W(s)$;
- 5) індекс нестійкості, рівний числу правих полюсів передаточної функції $W(s)$;
- 6) індекс не мінімальної фазовості, рівний числу правих нулів передаточної функції $W(s)$.

2. Види детермінованих вхідних впливів

Для порівняльного оцінювання динамічних властивостей ланок зміна вихідної величини звичайно розглядається при строго заданому значенні вхідної величини:

- у вигляді одиничної функції стрибка (стрибокподібного або імпульсного);
- у вигляді гармонійно мінливих коливань.

Одинична стрибкоподібна функція (функція Хефісайда) описує миттєве включення або відключення вхідного сигналу. Одиничну стрибкоподібну

функцію при $t = 0$ (рис. 2, а) прийнято позначати символом $1(t)$. Одиначна функція в цьому випадку записується:

$$1(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < 0 \\ 1, & \text{при } t \neq 0 \end{cases} \quad (9)$$

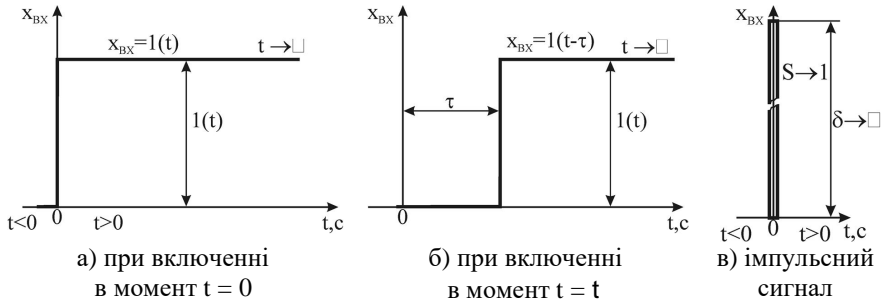


Рисунок 2 - Графіки одиничних стрибкоподібних функцій:

У випадку, якщо одиничний стрибок відбувається при $t^1 0$, із запізненням на час t (рис. 2, б), то функція записується так:

$$1(t - \tau) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < \tau \\ 1, & \text{при } t \neq \tau \end{cases} \quad (10)$$

під одиничною імпульсною функцією (дельта – функція, функція Дірака) розуміється гранично короткий імпульс загальної площею S рівною 1 (рис. 2, в):

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty, & \text{при } t = 0 \\ 0, & \text{при } t \neq 0 \end{cases} \quad (11)$$

Рівняння перехідного процесу при типовому впливі, показане в графічній формі, називається часовою або розгінною характеристикою ланки. Тобто, під часовою або розгінною характеристикою в загальному випадку розуміється графічна залежність процесу зміни вихідної величини у функції часу при переході системи з одного рівноважного стану в інший внаслідок подачі на вхід системи типового впливу.

Одиначна імпульсна і стрибкоподібна функції часто застосовуються для зняття часових характеристик системи або її окремих елементів. Імпульсна перехідна функція аналітично пов'язана з передаточною функцією і частотними характеристиками автоматичної системи.

Частотні характеристики відображають залежності амплітуди і фази від частоти синусоїдальних коливань при їх проходженні через ланку або систему.

Якщо на вхід елементарної ланки діє сигнал $x = A \sin \omega t$, то на її виході встановлюються синусоїдальні коливання, але з іншою амплітудою й зрушені по фазі на кут j : $y = B \sin(\omega t \pm j)$.

Частотні характеристики поділяються на амплітудно-частотні (АЧХ) й фазочастотні характеристики (ФЧХ).

Амплітудно-частотна характеристика відбиває залежність відношення амплітуди коливань на виході до амплітуди коливань на вході ланки або системи від частоти прикладеного вхідного впливу:

$$\frac{B}{A} = f(\omega) \quad (12)$$

Фазочастотною характеристикою називають залежність різниці фаз між вхідними й вихідними коливаннями від частоти прикладеного вхідного впливу:

$$\varphi = f(\omega) \quad (13)$$

У теорії автоматичного регулювання використовується сполучена амплітудо – фазочастотна характеристика (АФЧХ), яка виражає співвідношення між амплітудами вихідних і вхідних коливань і зрушенням фаз залежно від частоти. У загальному випадку амплітудо – фазочастотна характеристика складається з дійсної $R(\omega)$ і уявної $jQ(\omega)$ частин частотної характеристики:

$$W(j\omega) = R(\omega) + jQ(\omega) = W(\omega)e^{j\varphi(\omega)} \quad (14)$$

де $|W(\omega)| = \sqrt{R^2(\omega) + Q^2(\omega)}$ - модуль функції $W(j\omega)$;

$\varphi(\omega) = \arctg \frac{Q(\omega)}{R(\omega)}$ - фаза (аргумент) функції $W(j\omega)$.

На площині комплексної змінної АФЧХ зображується у вигляді кривої, яка називається годографом вектору $W(j\omega)$ при зміні частоти ω від $-\infty$ до $+\infty$.
Примітка.

Для полегшення розрахунків і кращої наочності доцільно будувати логарифмічні частотні характеристики, які відрізняються від частотних характеристик тільки масштабом. По осі абсцис замість величини ω відкладають величину $\lg \omega$ у логарифмічних одиницях (декадах або октавах), а по осі ординат – замість величини B/A відкладають величину $20 \lg B/A$, одиниця виміру якої називається децибелом (дБ).

3. Приклади визначення передаточних функцій

Приклад 1

Визначити передаточну функцію для схеми послідовно включених опору R і котушки індуктивності L (рис. 3), враховуючи, що вхідна дія - це прикладена напруга u , а вихідна - струм в колі i .

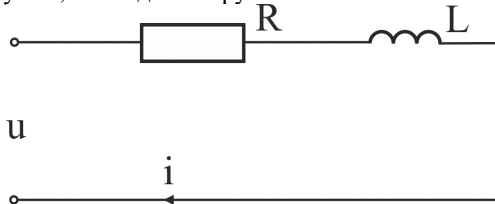


Рисунок 3 – Розрахункова схема RL - кола

Процеси в цій схемі описуються рівнянням:

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t)$$

Перейдемо до зображення за Лапласом:

$$U(s) = LsI(s) + RI(s) = I(s)(Ls + 1).$$

Складемо передаточну функцію як відношення зображення вихідної величини до зображення вхідної величини:

$$W(p) = \frac{I(s)}{U(s)} = \frac{1}{Ls + R} = \frac{\frac{1}{R}}{\frac{L}{R}s + 1} = \frac{k}{Ts + 1}$$

де k - коефіцієнт передачі, $k = 1/R$;

T - постійна часу, $T = L/R$.

Передаточні функції прийнято записувати в такій формі, щоб вільні члени поліномів дорівнювали б одиниці, що і зроблено в розглянутому прикладі.

Приклад 2

Визначити передаточну функцію схеми Γ - подібного фільтру з опору R і котушки індуктивності L (рис. 4), враховуючи, що вхідною величиною є напруга u_1 , а вихідною – напруга u_2 .

При визначенні передаточної функції будемо враховувати, що коло не навантажено (не підключено будь - яких елементів до вихідних затисків схеми, або ці елементи мають опір, що наближається до нескінченності) і опір джерела вхідної напруги настільки великий, що його можливо враховувати рівним нескінченності.

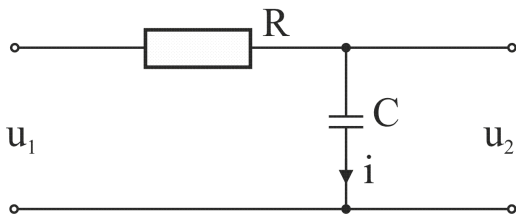


Рисунок 4 – Схема Γ -подібного RC - кола

$$\begin{cases} u_1(t) = i(t)R + u_c(t) & (a) \\ u_2(t) = u_c(t) & (б) \\ i(t) = C \frac{du_c(t)}{dt} & (в) \end{cases}$$

Зробимо підстановку виразу (в) у вираз (а) і отримаємо нову систему:

$$\begin{cases} u_1(t) = RC \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) \\ u_2(t) = u_c(t) \end{cases}$$

Перейдемо до зображення:
$$\begin{cases} U_1(s) = (RCs + 1)U_C(s) \\ U_2(s) = U_C(s) \end{cases}$$

Передаточна функція має вид:

$$W(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{U_C(s)}{(RCs + 1)U_C(s)} = \frac{1}{RCs + 1} = \frac{1}{Ts + 1}$$

де T - постійна часу, $T = RC$.

Приклад 3

Вивчити принцип дії і скласти функціональну схему автоматичної системи керування частотою обертання двигуна внутрішнього згорання з гнучким зворотним зв'язком, принципова схема якого приведена на рисунку 5, а.

Рішення

Роботу схеми неважко пояснити, користуючись рисунком 5, а. Сприймаючий орган СО, (рис. 5, б) - відцентрований маятник 1 через важіль АВ діє на золотник 3, що уявляє собою на функціональній схемі підсилюючий орган ПО.

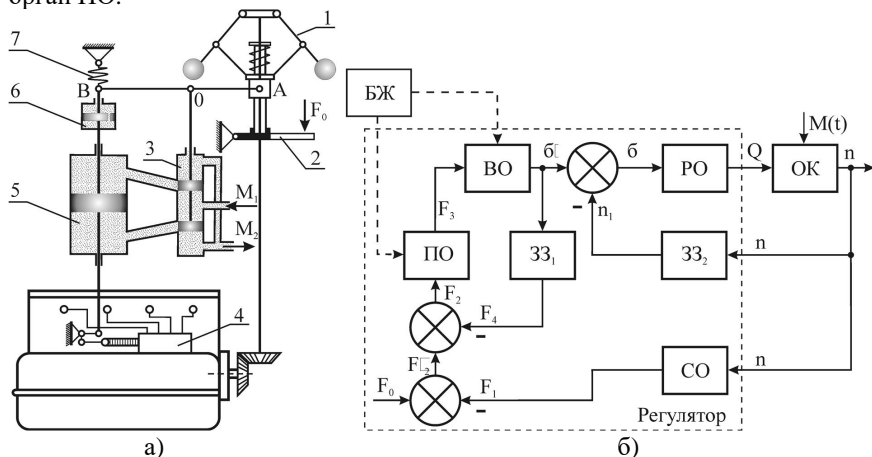


Рисунок 5 – Принципова (а) і функціональна (б) схеми автоматичної системи керування частотою обертання двигуна внутрішнього згорання

Поршнем сервомотору 5 – виконавчим органом ВО керують за допомогою золотника. Сервомотор переставляє рейку паливного насоса 4, який за функціональним призначенням виконує роль регулюючого органу РО, що змінює подання палива в циліндри двигуна - об'єкт керування ОК. Блоком живлення БЖ є насос гідросистеми.

Система має два зворотних зв'язки. Гнучкий зворотний зв'язок 33₁ з виходу виконавчого органу з підсилювальним органом утворюється завдяки важелю АВ і іздрому 6 з пружиною 7. Другий зворотний зв'язок 33₂ з

об'єктом керування на регулюючий орган з'являється в результаті конструктивного зв'язку паливного насоса з валом двигуна - частота обертання насоса n_1 пропорційна числу обертів двигуна n .

Ізодромний пристрій забезпечує астатичну характеристику регулювання, тобто точну стабілізацію частоти обертання при зміні в широких межах збурення $M(t)$ - момент на валу двигуна. Наприклад, при зменшенні навантаження частота обертання двигуна збільшиться, важіль АВ обернеться навколо точки В і перемістить поршні золотника 3 вгору. Масло M_1 під тиском поступить у верхню порожнину сервомотору 4, і його поршень, рухаючись вниз, пересуне рейку насосу у бік зменшення подання палива.

Одночасно переміститься униз поршень 6 ізодрому і розтягнеться пружина 7, оскільки масло з нижньої порожнини циліндру ізодрому не встигає швидко перетекти у верхню порожнину через малий отвір в поршні. При цьому важіль АВ обертається навколо точки А і закриває вікна золотника 3, внаслідок чого поршень сервомотора припиняє свій рух при частоті обертання двигуна дещо вищій за первинну. Потім під дією пружини 7 точка В важеля АВ поступово, у міру перетікання масла в циліндрі 6, піднімається у своє початкове положення і знову відкриває вікна золотника 3.

Процес повторюється доти, поки в системі не наступить рівновага, якій відповідає строго визначена частота обертання двигуна. Такий регулятор має назву астатичного або ізодромного.

Приклад 3,а

Визначити рівняння руху і передаточну функцію ізодромного механізму – ланки ЗЗ₁ зворотного зв'язку системи автоматичного керування, зображеної на рисунку 5.

Рішення

Рівняння руху ізодрому без врахування сил інерції рушійних його мас:

$$F_{\Pi} + F_K = 0$$

де $F_{\Pi} = b\Delta z$ - сила пружини ізодрому;

b - коефіцієнт жорсткості;

Δz - переміщення пружини;

F_K -- сила ізодрому, $F_K = v \frac{d\Delta z_K}{dt} - k_{\Pi} v \frac{d\Delta z_{\Pi}}{dt}$;

n - коефіцієнт пропорційності, що залежить від в'язкості масла і прохідного перерізу порожнин ізодрому;

Δz_K - переміщення порожнини катаракта;

Δz_{Π} - переміщення порожнини поршня;

k_{Π} - коефіцієнт пропорційності, що показує, в скільки разів z_{Π} відрізняються від z_K .

Розкривши доданки початкового рівняння, отримаємо:

$$b\Delta z_K + v \frac{d\Delta z_K}{dt} - k_{\Pi} v \frac{d\Delta z_{\Pi}}{dt} = 0 \quad \Delta z_K = \Delta z$$

або

$$(T_{Ks} + 1)\Delta z_K = k_{\Pi} T_{Ks} \Delta z_{\Pi}$$

звідси

$$W_{33_1}(s) = \frac{\Delta z_K}{\Delta z_{\Pi}} = \frac{k_{\Pi} T_{Ks}}{T_{Ks} + 1}$$

де $T_K = \frac{v}{b}$; $k_{\Pi} = \frac{\Delta z_{K_0}}{\Delta z_{\Pi_0}}$.

Приклад 3, б

Визначити передаточну функцію сервомотору 5 з двостороннім відсічним золотником для системи автоматичного керування, зображеної на рисунку 5.

Рішення

Рівняння руху поршня серводвигуна складають з урахуванням напрямку його руху. Наприклад, для руху поршня вгору рівняння має вид:

$$S_2 q_2 - S_1 q_1 + F_P = 0$$

де q_1, q_2 - відповідно високий і низький тиск в порожнинах циліндру;

S_1, S_2 - площа поршня зі сторони областей низького і високого тиску;

F_P - сила опору керуючого органу.

Рівняння нерозривності для площин 1 і 2 такі:

$$S_1 \frac{d\Delta z_{\Pi}}{dt} = \Delta x a \mu \sqrt{\frac{2g}{\gamma}} (q_1 - q_C)$$

$$S_2 \frac{d\Delta z_{\Pi}}{dt} = \Delta x a \mu \sqrt{\frac{2g}{\gamma}} (q_H - q_2)$$

де q_C, q_H - тиск в площині зливу і низького тиску картеру;

Δz_{Π} - координата руху поршня;

Δx - координата руху золотника;

a - ширина золотникового отвору;

μ - коефіцієнт пропорційності витікання;

g - прискорення вільного падіння;

γ - щільність робочої рідини.

Визначивши з цих рівнянь значення q_1 і q_2 і підставивши їх в формулу, після кінцевих перетворень отримуємо:

$$\Delta x = \sqrt{\frac{\gamma(S_1^2 + S_2^2)}{2g(S_2 q_H - S_1 q_C + F_P) a^2 \mu^2}} \frac{d\Delta z_{\Pi}}{dt}$$

або

$$\Delta x = T_c \frac{dz_{\Pi}}{dt} = T_c s \Delta z_{\Pi}$$

де T_c - постійна часу серводвигуна.

Звідки передаточна функція

$$W(s) = \frac{\Delta z_{\Pi}}{\Delta x} = \frac{1}{T_c s}$$

Приклад 3, в

Скласти рівняння руху і знайти передаточну функцію об'єкта керування для двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ), як системи автоматичного керування (рис. 5).

Рішення

Крутячий момент M_D двигуна врівноважується моментом опору M_C і моментом інерції - $J \frac{d\omega}{dt}$.

$$M_D - M_C = J \frac{d\omega}{dt}$$

Крутячий момент ДВЗ

$$M_D = 75 \frac{\gamma z^{3,27}}{k_1 g_e \omega}$$

де g - щільність палива;

k_1 - конструктивний коефіцієнт;

z - корисний хід рейки паливного насосу;

g_e - питомі ефективні витрати палива;

ω - частота обертання ДВЗ, $\omega = \frac{\pi n}{60}$.

Момент опору:

$$M_C = B \omega^m$$

де B і m - деякі постійні, що визначаються робочою машиною.

Провівши лінеаризацію рівнянь за допомогою ряду Тейлора і вирішивши їх, отримуємо в приростах:

$$J \frac{d\omega}{dt} + \left(75 \frac{\gamma z_0^{3,27}}{k_1 g_e \omega_0^2} + m B \omega_0^{m-1} \right) \Delta \omega = 245 \frac{\gamma z_0^{3,27}}{k_1 g_e \omega_0} \Delta z$$

або

$$J \frac{d\omega}{dt} + F_g \Delta \omega = k_g \Delta z$$

звідки

$$\frac{J}{F_g} \frac{d\omega}{dt} + \Delta\omega = \frac{k_g}{F_g} \Delta z$$

де F_g - фактор стійкості ДВЗ;

k_g - ступень зміни моменту M_d при переміщенні рейки паливного насосу.

В кінцевому вигляді:

$$(T_{дs} + 1)\Delta\omega = k_{д}\Delta z$$

де $T_{д}$ і $k_{д}$ – постійна часу і коефіцієнт підсилення ДВЗ.

Передаточна функція ДВЗ

$$W(s) = \frac{\Delta\omega}{\Delta z} = \frac{k_{д}}{T_{дs} + 1}$$

Приклад 3, з

Скласти диференціальне рівняння і визначити передаточну функцію відцентрового маятника 1 (ВМ) – сприймаючого органу системи автоматичного керування (рис. 5).

Рішення

Рівняння рівноваги сил, приведених до муфти ВМ, можна записати в природних:

$$\Delta F_{ц} = \Delta F_{п} + \Delta F_i + \Delta F_T$$

Приріст відцентрованої сили вантажів:

$$\Delta F_{ц} = am_{\Gamma} \frac{l_1}{l_2} \left(r_M + \frac{l_1}{l_2} z_0 \right) i^2 2\omega_0 \Delta\omega + am_{\Gamma} \left(\frac{l_1}{l_2} i\omega_0 \right)^2 \Delta z$$

де a - конструктивний коефіцієнт ВМ;

m_{Γ} , l_1 , l_2 - маса вантажів і геометричні розміри їх розташування;

r_M - мінімальний радіус обертання ВМ;

i - передаточне число частоти обертання від колінчастого валу двигуна до валу ВМ;

z_0 - початкове значення переміщення муфти ВМ;

ω - частота обертання валу двигуна.

Приріст сили протидії пружин приросту $\Delta F_{п}$

$$\Delta F_{п} = b\Delta z$$

де b - коефіцієнт жорсткості пружин.

Приріст сили інерції усіх рухомих мас $m\phi$ ВМ

$$\Delta F_i = m \phi \frac{d^2 \Delta z}{dt^2}$$

Приріст сили в'язкого тертя муфти ВМ

$$\Delta F_T = v \frac{d\Delta z}{dt}$$

де n - коефіцієнт в'язкого тертя.

Підставивши значення DF_{Π} , DF_{Π} , DF_i і DF_T в рівняння рівноваги сил і виконавши перетворення відносно Δz і $D\omega$, отримуємо:

$$m^e \frac{d^2 \Delta z}{dt^2} + v \frac{d \Delta z}{dt} + \left[b - am_{\Gamma} \left(\frac{l_1}{l_2} i \omega_0 \right)^2 \right] \Delta z = am_{\Gamma} \frac{l_1}{l_2} \left(r_M + \frac{l_1}{l_2} z_0 \right) i 2 \omega_0 \Delta \omega$$

Після перетворень дане рівняння запишемо в операторній формі:

$$(T_2^2 s^2 + T_1 s + 1) \varphi = k_M \eta$$

де

$$k_M = \frac{am_{\Gamma} \frac{l_1}{l_2} (r_M + \frac{l_1}{l_2} z_0) i^2 2 \omega_0^2}{\left[b - am_{\Gamma} \left(\frac{l_1}{l_2} i \omega_0 \right)^2 \right] z_0} ; T_2^2 = \frac{m^e}{b - am_{\Gamma} \left(\frac{l_1}{l_2} i \omega_0 \right)^2} ; T_1 = \frac{v}{b - am_{\Gamma} \left(\frac{l_1}{l_2} i \omega_0 \right)^2}$$

$$\varphi = \frac{\Delta z}{z_0} ; \quad \eta = \frac{\Delta \omega}{\omega_0}$$

Передаточна функція ВМ

$$W_M(s) = \frac{\varphi}{\eta} = \frac{k_M}{T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}$$

Приклад 4

По заданому диференціальному рівнянню визначити операторну форму рівняння при нульових початкових умовах та передаточну функцію.

Дано диференціальне рівняння, що характеризує динаміку технологічного об'єкта:

$$6,25 \frac{d^2 y}{dt^2} + 4 \frac{dy}{dt} + y = 9x - 1,2 \frac{dx}{dt} - 5 \frac{du}{dt}$$

Якщо позначити $Y(s)$, $X(s)$ і $U(s)$ як зображення сигналів $y(t)$, $x(t)$ і $u(t)$ відповідно, то операторна форма рівняння (при нульових початкових умовах) в даному випадку прийме вигляд:

$$6,25s^2 Y(s) + 4s Y(s) + Y(s) = 9X(s) - 1,2s X(s) - 5s U(s).$$

Дане рівняння можна перетворити, якщо винести $Y(s)$ і $X(s)$ за дужки:

$$Y(s) (6,25s^2 + 4s + 1) = X(s) (9 - 1,2s) - 5s U(s).$$

Звідси отримуємо:

$$Y(s) = \frac{9 - 1,2s}{6,25s^2 + 4s + 1} X(s) - \frac{5s}{6,25s^2 + 4s + 1} U(s)$$

Якщо позначити передаточні функції об'єкту як:

$$W_x(s) = \frac{9 - 1,2s}{6,25s^2 + 4s + 1} \quad \text{і} \quad W_u(s) = \frac{5s}{6,25s^2 + 4s + 1},$$

то отримаємо рівняння:

$$Y(s) = W_x(s) X(s) + W_u(s) U(s)$$

Приклад 5

По заданій передаточній функції записати диференціальне рівняння. Дана передаточна функція вигляду:

$$W(s) = \frac{7s^3 + 5,5}{(s - 0,5)(3s^2 + 2)}$$

Для запису диференціального рівняння необхідно врахувати, що по визначенню $W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}$, звідки отримуємо:

$$W(s) = \frac{7s^3 + 5,5}{(s - 0,5)(3s^2 + 2)} = \frac{Y(s)}{X(s)}$$

$$Y(s)(s - 0,5)(3s^2 + 2) = X(s)(7s^3 + 5,5),$$

$$Y(s)(3s^3 - 1,5s^2 + 2s - 1) = X(s)(7s^3 + 5,5),$$

$$3s^3Y(s) - 1,5s^2Y(s) + 2sY(s) - Y(s) = 7s^3X(s) + 5,5X(s).$$

Якщо застосувати зворотнє перетворення Лапласа, отримуємо:

$$3 \frac{d^3y}{dt^3} - 1,5 \frac{d^2y}{dt^2} + 2 \frac{dy}{dt} - y = 7 \frac{d^3x}{dt^3} + 5,5x$$

Приклад 6

Знайти функцію ваги $w(t)$ по відомій перехідній функції

$$h(t) = 2(1 - e^{-0,2t})$$

Рішення

Відомо, що $g(t) = h'(t)$. Тому, провівши диференціювання початкового виразу, отримуємо:

$$w(t) = 0,4e^{-0,2t}$$

Приклад 7

Знайти передаточну функцію $W(s)$ системи по відомій функції ваги:

$$g(t) = 5t$$

Рішення

Використовуючи зв'язок між передаточною функцією і функцією ваги

$$W(s) = L[g(t)]$$

можна отримати

$$W(s) = L(5t) = \frac{5}{s^2}$$

Приклад 8

По передаточній функції системи

$$W(s) = \frac{k_1}{s} + k_2$$

знайти її реакцію на одиничний стрибкоподібний вплив (перехідну функцію).

Виходячи з виразу передаточної функції, можна зробити висновок, що ланки з коефіцієнтами передачі k_1 і k_2 з'єднані паралельно.

Рішення

Як впливає з умови, ланки з передаточними функціями k_1 і k_2 з'єднані паралельно. По принципу суперпозиції, справедливому для лінійних систем, можна зробити висновок, що

$$h(t) = h_1(t) + h_2(t)$$

де $h(t)$ - перехідна функція всієї системи;

$h_1(t)$ - перехідна функція інтегруючої ланки;

$h_2(t)$ - перехідна функція підсилювальної ланки.

Відомо, що

$$h_1(t) = k_1 t,$$

$$h_2(t) = k_2 1(t)$$

Тоді

$$h(t) = k_1(t) + k_2 1(t)$$

Приклад 9

Знайти АЧХ і ФЧХ за відомою передаточною функцією системи:

$$W(j\omega) = \frac{2}{4s + 1}$$

Рішення

Якщо записати – $W(j\omega) = R(\omega) + jQ(\omega)$

де $R(\omega)$ – дійсна частина

$Q(\omega)$ – уявна частина

Тому АЧХ і ФЧХ визначаються відповідно за формулами:

$$A(\omega) = \sqrt{R^2(\omega) + Q^2(\omega)} \quad \varphi(\omega) = \arctg \frac{Q(\omega)}{R(\omega)}$$

Частіше передаточна функція $W(j\omega)$ є дробом

$$W(j\omega) = \frac{B(j\omega)}{A(j\omega)} = \frac{R_1(\omega) + jQ_1(\omega)}{R_2(\omega) + jQ_2(\omega)}$$

Тоді, використовуючи відомі в теорії комплексних чисел співвідношення і підставивши початкову передаточну функцію, отримуємо:

$$A(\omega) = \frac{|B(j\omega)|}{|A(j\omega)|} = \frac{\sqrt{R_1^2(\omega) + Q_1^2(\omega)}}{\sqrt{R_2^2(\omega) + Q_2^2(\omega)}} = \frac{2}{\sqrt{16\omega^2 + 1}}$$

$$\begin{aligned}\varphi(\omega) &= \arg B(j\omega) - \arg A(j\omega) = \operatorname{arctg} \frac{Q_1(\omega)}{R_1(\omega)} - \operatorname{arctg} \frac{Q_2(\omega)}{R_2(\omega)} = 0 - \operatorname{arctg} 4\omega \\ &= -\operatorname{arctg} 4\omega\end{aligned}$$

ЗАВДАННЯ ДО САМОСТІЙНОЇ ДОМАШНЬОЇ ПІДГОТОВКИ

1. Відновити знання по диференціюванню та інтегруванню математичних виразів.
2. Відновити знання по методам операційного числення.
3. Відновити поняття про елементарну ланку системи автоматичного керування [практична робота № 1].
4. Відповісти на контрольні запитання.

ПРОГРАМА ЗАНЯТТЯ

1. Вивчення основних теоретичних відомостей до практичного заняття.
2. Проведення поточного тематичного письмового тестування за темою заняття.
3. Виконання завдання 1 згідно варіантів, які обираються за вказівкою викладача.
4. Виконання завдання 2 згідно варіантів, які обираються за вказівкою викладача.

Завдання 1. Визначення передаточної функції системи $W(s)$ по диференціальному рівнянню при нульових початкових умовах.

Завдання 2. Визначення диференціального рівняння по заданій передаточній функції системи $W(s)$ при нульових початкових умовах.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Як можна описати динамічні властивості елемента автоматики або системи автоматичного керування взагалі?
2. Що таке передаточна функція системи автоматичного керування?
3. Що таке амплітудо – частотна характеристика (АЧХ) елемента автоматики або системи автоматичного керування взагалі?
4. Що таке фазо – частотна характеристика (ФЧХ) елемента автоматики або системи автоматичного керування взагалі?
5. Що таке амплітудо - фазо – частотна характеристика (АФЧХ) елемента автоматики або системи автоматичного керування взагалі?
6. Що таке часова характеристика елемента автоматики або системи автоматичного керування взагалі?
7. В чому різниця між перехідною і імпульсною характеристиками для елемента автоматики?
8. Як отримати перехідну характеристику для елемента автоматики?

9. Як отримати імпульсну характеристику для елемента автоматики?
10. Як отримати частотну характеристику для елемента автоматики?
11. Як отримати передаточну функцію для системи автоматичного керування якщо існує диференційне рівняння?
12. Як отримати диференційне рівняння для системи автоматичного керування якщо існує передаточна функція?

ПРАКТИЧНА РОБОТА

ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ КЕРУВАННЯ (РЕГУЛЮВАННЯ) СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Мета заняття: ознайомитися і засвоїти існуючі принципи керування, що використовуються в сучасних системах автоматичного керування

СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Система автоматичного керування складається з *керуючих пристроїв* (КП) і *об'єкта керування* (ОК). Величини, що характеризують стан ОК, мають назву *вихідних* або *керованих*. Впливи, що поступають на вхід КП, мають назву *задаючих*. Впливи, що виробляються КП і безпосередньо змінюють стан ОК, мають назву *керуючих*. Впливи, що викликають несанкціоноване відхилення керованої величини від заданого значення, мають назву *збурюючої дії*. Задаючі і збурюючі дії об'єднують в групу *вхідних впливів*.

У процесі роботи об'єкт керування піддається впливу різноманітних зовнішніх збурень, унаслідок чого керована величина відхиляється від необхідного значення. Тому пристрій керування забезпечує відповідність керованої величини заданому значенню шляхом передачі на об'єкт керування необхідної керуючої дії.

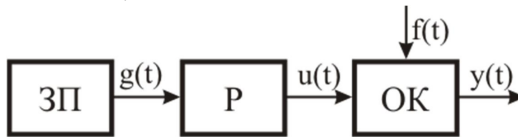
За способом визначення керуючої дії, необхідної для компенсації відхилення керованої величини від необхідного значення, розрізняють чотири принципи керування:

1. Керування за задаючою дією або за принципом розімкнутого керування;
2. Керування за збуренням, коли керуюча дія на об'єкт формується залежно від величини дії, що задається і однієї чи декількох зовнішніх дій на ОК;
3. Керування за відхиленням, коли керуюча дія на об'єкт формується залежно від відхилення дійсного значення керованої координати від заданого значення;
4. Комбіноване керування, коли керуюча дія на об'єкт формується залежно від відхилення дійсного значення керованої координати від заданого значення і величини однієї чи декількох зовнішніх дій на ОК.

Принцип розімкнутого керування (керування за задаючим впливом).

Суть принципу розімкненого керування полягає в тому, що процес керуваннябудеться тільки на базі заданого алгоритму функціонування і не контролюється по фактичному значенню керованої величини, тобто поточний стан ОК не враховується при виробленні дій, що керують. Процес роботи системи не залежить безпосередньо від результату її дії на об'єкт керування. Структурна схема керування має вигляд розімкненого кола (рис. 1), тобто керуючий пристрій чинить дію на об'єкт керування, але зворотна дія відсутня.

Задаючий пристрій (ЗП) подає задаючу дію $g(t)$, яка перетворюється керуючим пристроєм в керуючу дію $u(t)$. Під впливом керування стан об'єкта керування ОК, що характеризується керованою величиною $y(t)$, змінюється так, щоб значення $y(t)$ було рівним необхідному значенню, величина якого визначається задаючою дією $g(t)$. Наявність збурюючої дії $f(t)$ призводить до того, що дійсне значення керованої величини $y(t)$ відрізняється від заданого, тобто з'являється помилка керування. У випадку якщо дія збурень є постійною або періодичною, помилка керування накопичується, і може статися відмова системи. Тому принцип розімкненого керування не застосовують в умовах значних перешкод і збурень. У відсутності збурень відтворення заданої величини забезпечується жорсткістю характеристик пристроїв, що входять до складу схеми. Розімкнене керування в чистому вигляді застосовується рідко і тільки в простих системах.



ЗП – задаючий пристрій; Р – регулятор (керуючий пристрій);
 ОК – об'єкт керування; $g(t)$ – задаючий вплив; $u(t)$ – керуюча дія;
 $f(t)$ - збурюючий вплив ; $y(t)$ – вихідний сигнал
 Рисунок 1- Структурна схема керування з розімкненим колом

Розглянемо розімкнену систему керування температурою електронагрівального елемента (рис. 2). В якості керуючого пристрою, в схемі використовується змінний резистор, положення рухливого контакту якого визначає величину керуючої напруги $U_{\text{КЕР}}$, як долю вхідної напруги $U_{\text{ВХ}}$, що подається на електронагрівальний елемент. У побутових електрообігрівачах необхідна температура задається вручну з використанням регулятора або позиційного перемикача. У промислових електронагрівачах закон зміни температури нагріву може задаватися профілем кулачка (рис. 2).

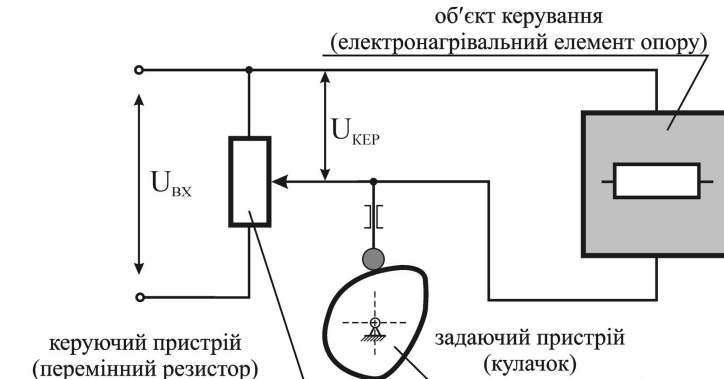


Рисунок 2 - Розімкнена система керування температурою електронагрівача

Розглянемо ситуацію, пов'язану з виникненням в розімкненій САК помилки керування в умовах дії збурення на прикладі діаграм роботи розімкненої САК температурою нагріву побутового електрообігрівача з двопозиційним перемикачем (рис. 3).

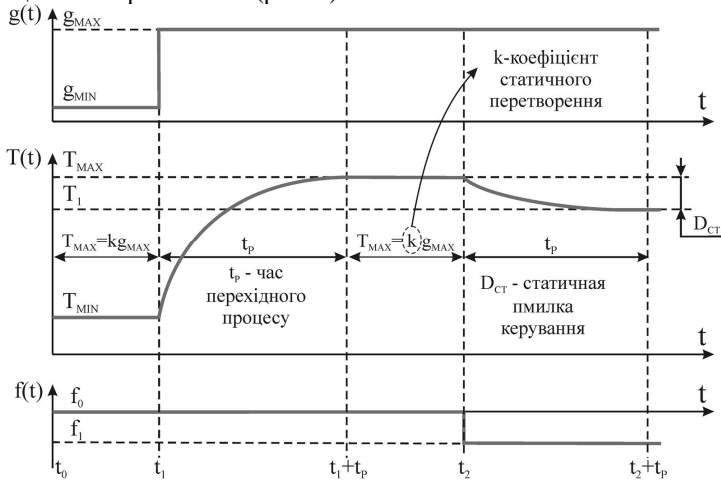


Рисунок 3 – Часова діаграма роботи розімкненої САК температурою нагріву електрообігрівача з двопозиційним перемикачем

Нехай перемикач, окрім положення "вимкнено" має два положення, що відповідають мінімальній і максимальній температурі нагріву. До моменту часу t_0 електрообігрівач деякий час був включений на мінімальну температуру нагріву - положення перемикача відповідало g_{MIN} , і температура вже досягла значення T_{MIN} . Система знаходиться в сталому стані рівноваги, що описується залежністю:

$$T_{MIN} = k \cdot g_{MIN} \quad (1)$$

де k – коефіцієнт статичного перетворення САК.

Стан рівноваги зберігається в системі до моменту часу t_1 . У момент часу t_1 користувач електрообігрівача перемикає регулятор в положення "MAX". Оскільки зміна положення перемикача відбувається практично миттєво, зміну величини задаючої дії $g(t)$ в момент часу t_1 можна зображувати ідеальною сходиною (рис. 3). При цьому процес перетворення електричної енергії в теплову є більш інерційним, у зв'язку з цим температура нового значення досягне не відразу, а за деякий час перехідного процесу t_p . Закон зміни температури під час перехідного процесу носить плавний характер.

Після завершення перехідного процесу рівновага в системі відновиться - з моменту часу $t_1 + t_p$ виконується рівність:

$$T_{MAX} = k \cdot g_{MAX} \quad (2)$$

Встановлена рівновага зберігатиметься в системі до моменту часу t_2 , в який в системі починає діяти деяке збурення. Припустимо, що це збурення полягає в спаді вхідної напруги (рис. 3). В результаті, при незмінному

положенні регулятора $g(t_2) = g_{\max}$ температура електрообігрівача почне знижуватися і після завершення перехідного процесу у момент часу $t_2 + t_p$ досягне деякого нового значення T_1 , відмінного від необхідного T_{\max} . Система прийде до стану рівноваги, але в цьому стані матиме місце статична помилка керування $D_{\text{ст}}$, рівна величині відхилення фактичного перехідного процесу значення керованої величини, що встановився після завершення, від заданого значення (рис. 3).

Принцип зворотного зв'язку. Для можливості контролю параметрів об'єкта керування і для покращення характеристик систем автоматики передбачають лінії зворотного зв'язку.

Лінії зворотного зв'язку – це лінії зв'язку, по яких інформація передається в зворотному напрямку в порівнянні з керуючим впливом.

В автоматичних системах використовуються такі види зворотного зв'язку:

- **додатний зворотний зв'язок** – знак сигналу зворотного зв'язку і задаючого впливу *співпадають*;
- **від'ємний зворотний зв'язок** – знак сигналу зворотного зв'язку і задаючого впливу *не співпадають*;
- **жорсткий зворотний зв'язок** – передаючий вплив залежить тільки від регульованого параметру і не залежить від часу (працює постійно);
- **гнучкий зворотний зв'язок** – діє тільки в перехідному процесі, тобто існує тільки тоді, коли керована величина змінюється в часі;
- **головний зворотний зв'язок** – з'єднує вихід системи автоматики з її входом, тобто зв'язує керовану величину із задаючою величиною від задаючого пристрою;
- **додатковий зворотний зв'язок** – передає сигнал впливу з виходу будь - якого елемента системи (наприклад, підсилювача) на вхід будь - якого попереднього елемента для покращення характеристики окремих елементів системи.

Найбільше розповсюдження в автоматичних системах керування отримав принцип *зворотного зв'язку* (рис. 4). Тут керуючий вплив корегується пристроєм КП в залежності від вихідної величини $y(t)$. І вже не важливо, які збурення діють на ОК.

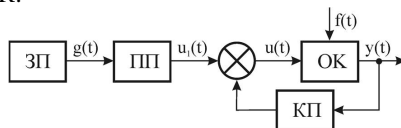


Рисунок 4 – САК із зворотним зв'язком

Якщо значення $y(t)$ відхиляється від потрібного, то відбувається коригування сигналу $u(t)$ з метою зменшення цього відхилення. Зв'язок виходу ОК з його входом має назву *головного зворотного зв'язку* (ЗЗ). В окремому випадку (рис. 5) задаючий пристрій (ЗП) формує необхідне значення вихідної величини $g(t)$, яке порівнюється з дійсним значенням на виході САК $y(t)$.

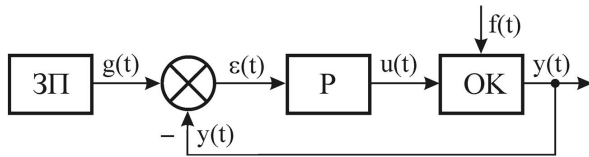


Рисунок 5 – САК із зворотним зв'язком по відхиленню від заданої величини

Відхилення $\varepsilon = g(t) - y(t)$ з виходу порівнюючого пристрою подається на вхід регулятора Р, що поєднує в собі підсилювальний пристрій (ПП), керуючий орган (КО) і чутливий елемент (ЧЕ). Якщо $\varepsilon(t) \neq 0$, то регулятор формує керуючий вплив $u(t)$, діючий доти, поки не буде забезпечена рівність $\varepsilon(t) = 0$ або $y(t) = g(t)$. На регулятор подається різниця сигналів, тому такий зворотний зв'язок називається *від'ємним* на відміну від *додатного* зворотного зв'язку, коли сигнали $g(t)$ і $y(t)$ складаються. Таке керування функції відхилення називається регулюванням, а подібну САК називають системою автоматичного регулювання (САР). Для прикладу на рис. 6 зображена спрощена схема САР хлібопекарської печі.

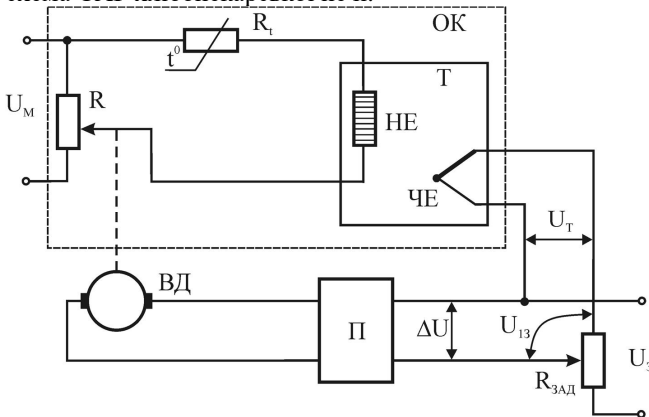


Рисунок 6 – Спрощена схема САР хлібопекарської печі з регулятором

Роль задаючого пристрою ЗП виконує потенціометр $R_{\text{Зад}}$, напруга на якому U_3 порівнюється з напругою на терморпарі U_T . Їх різниця ΔU через підсилювач П подається на виконавчий двигун постійного струму ВД, який регулює через редуктор положення повзунка реостату R в колі нагрівального елемента (HE). Наявність підсилювача говорить про те, що дана САР є системою непрямого регулювання, оскільки енергія для функцій керування береться від сторонніх джерел живлення на відміну від систем прямого регулювання, в яких енергія береться безпосередньо від об'єкта керування ОК, як наприклад, в САР рівня води в баку (рис. 7).

Для підтримки постійного рівня води в баку Н використовується чутливий елемент (ЧЕ) у вигляді поплавця, який постійно знаходиться на її поверхні. При збільшенні витрати води $Q_{\text{вих}}$ її рівень Н починає знижуватися.

Поплавок ЧЕ переміщується вниз і через тягу ЗП і важіль ЗЗ (негативний зворотний зв'язок) впливає на керуючий орган КО (засувка) - збільшується подача води $Q_{ВХ}$ в бак. Збільшення подачі $Q_{ВХ}$ приводить до підняття рівня води в баку. В результаті чого поплавок ЧЕ піднімається і прикриває засувку КО. Подача води зменшується, і рівень води стабілізується навколо заданого рівня, змінюваного довжиною тяги ЗП. Недоліком принципу зворотного зв'язку є інерційність системи. Тому часто застосовують комбінацію даного принципу з принципом компенсації, що дозволяє об'єднати переваги обох принципів: швидкість реакції на збурення принципу компенсації і точність регулювання незалежно від природи збурень принципу зворотного зв'язку. Системи, що мають один або кілька місцевих зворотних зв'язків, називаються багатоконтурними. У цих системах вплив, що прикладений до того чи іншого елемента, може обійти всю систему і повернутися у вихідну точку декількома шляхами обходу.

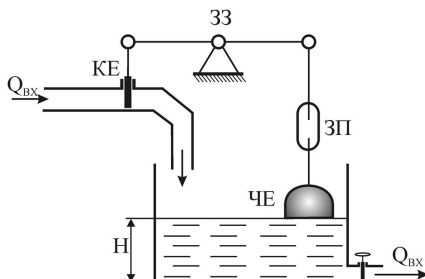


Рисунок 7 – САК рівня води в баку

Принцип керування за збуренням (принцип Понселе – Чиколєва). Його було запропоновано французом Жаном-Віктором Понселе (01.07.1788 – 22.12.1867)- французьким математиком та інженером, що створив проективну геометрію, і є одним із засновників вивчення властивостей матеріалів у матеріалознавстві. Одночасно із заняттями чистою математикою він продовжив свою діяльність як військовий інженер і окрім робіт технічного характеру з будівельної механіки - займався зокрема паровою механікою, гідравлічними двигунами та спорудами. Принцип керування за збуренням вперше широко використано в регуляторах дугових ламп освітлення російським електротехніком В. М. Чиколєвим (04.08.1845 – 05.03.1898) у другій половині XIX ст.

Керування за збуренням ґрунтується на принципі компенсації збурень. При такому принципі керований параметр не змінюється, а використовується лише інформація про зовнішню дію на об'єкт. При цьому визначають основну збурюючу дію і встановлюють, як необхідно змінювати керуючу дію на об'єкт керування, щоб значення керованих параметрів підтримувались незмінними. Функціональна схема такої САК представлена на рис. 8.

В САК з принципом керування за збуренням керуюча дія на об'єкт визначається так:

$$x(t) = F\{g(t), f(t)\} \quad (3)$$

Принцип керування за збуренням полягає в тому, що для усунення відхилення вектору вихідних параметрів від необхідного значення, викликаного збурюючою дією, виміряна величина цього збурення перетворюється в керуючу дію, яка прикладається до об'єкта керування і викликає компенсоване відхилення керованої величини протилежного знаку в порівнянні з відхиленням, яке викликане цією дією.



$f_1(t), \dots, f_n(t)$ - збурюючі дії на ОК, $X_{зад}(t)$ - задаюча дія, $y(t)$ - вихідна величина.

Рисунок 8 - Структура САК, що побудована на основі принципу керування за збуренням

Для визначення основних закономірностей, притаманних для САК, побудованих на основі цього принципу, розглянемо систему, функціональна схема якої представлена на рис. 9.

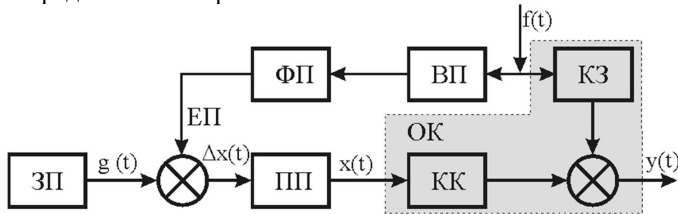


Рисунок 9- Функціональна схема САК, побудованої на основі принципу керування за збуренням

В САК, які використовують принцип керування за збуренням, входять наступні елементи:

- задаючий пристрій (ЗП), необхідний для реалізації алгоритму роботи об'єкта керування, який формує керуючу дію $g(t)$;
- елемент порівняння (ЕП), забезпечує необхідну точність системи $Dx(t)$;
- вимірювальний перетворювач (ВП), забезпечує вимірювання вибраного збурення на об'єкт керування;
- функціональний перетворювач (ФП), формує необхідну за умовами роботи САК статичну характеристику;
- проміжний підсилювач (ПП), забезпечує формування необхідного закону керування ОК.
- об'єкт керування (ОК).

Використання принципу керування за збуренням забезпечує компенсацію дії лише вимірjuвальних зовнішніх збурень.

Переваги такого способу керування:

- можливість повної компенсації збурюючої дії на об'єкт керування;
- стійкість керування забезпечується відсутністю інформації про істинний стан ОК.

Недоліки:

- усунення дії лише тих збурень, для яких створені компенсаційні канали обробки величин цих дій;
- наявність великої кількості неконтрольованих збурень збільшує похибку стабілізації вихідної величини;
- неможливість застосування керування лише до об'єктів, якісні і кількісні характеристики яких невідомі.

Принцип керування за відхиленням (дійсного значення вихідної величини об'єкта від його заданого значення) було запропоновано І. І. Ползуновим (14.03.1728 – 27.05.1766) і вперше реалізовано в 1765 р. в його паровій машині для підтримки сталого рівня води в котлі. Російський винахідник створив першу в Росії парову машину та перший в світі двоциліндровий паровий двигун. В 1784 р. шотландський інженер-механік Дж. Уатт (30.01.1737 – 19.08.1819 - його ім'ям названа одиниця потужності – Ватт) вдосконалив парову машину Ньюкомена. Він винайшов універсальну парову машину подвійної дії. Роботи Уатта поклали початок промисловій революції спочатку в Англії, а потім і у всьому світі. Вперше використав для стабілізації швидкості обертання парової машини відцентровий регулятор, який також діяв на принципі керування за відхиленням, тому цей принцип керування інколи називають компенсаційним принципом Ползунова-Уатта.

Більш високу якість керування дозволяють одержати замкнуті САК, в яких використовується інформація про керований параметр (рис. 10). У таких системах вимірюється значення керованого параметра. Пристрій керування проводить порівняння одержаного сигналу із заданим значенням, і при наявності різниці виробляє керуючу дію, яка направлена на зменшення одержаної величини відхилення заданого і виміряного значень параметрів. При цьому пристрій керування компенсує це відхилення незалежно від причин, які його викликали. Такий спосіб керування є основним для більшості сучасних САК.



Рисунок 10 - Структура САК, побудованої на основі принципу керування за відхиленням

У САК, які використовують принцип керування за відхиленням, керуюча дія на об'єкт визначається так:

$$x(t) = F\{g(t), y(t)\} \quad (4)$$

Розглянемо систему автоматичного керування зі зворотним зв'язком, функціональна схема якої представлена на рис. 11.

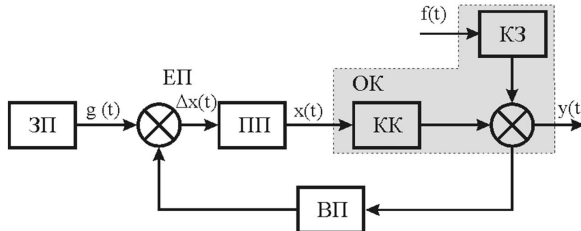


Рисунок 11 - Функціональна схема САК, побудована на основі принципу керування за відхиленням

В САК, які використовують цей принцип керування, входять наступні основні елементи:

- задаючий пристрій (ЗП), необхідний для реалізації алгоритму роботи об'єкта керування, який формує керуючу дію $x(t)$;
- вимірювальний перетворювач (ВП), який забезпечує вимірювання керованої координати;
- елемент порівняння (ЕП), який виявляє відхилення $\Delta x(t)$ керованої координати $y(t)$ від її необхідного значення;
- проміжний підсилювач (ПП), який забезпечує формування необхідного закону керування ОК;
- об'єкт керування (ОК).

Принцип роботи САК полягає у вимірюванні керованої координати $y(t)$ за допомогою ВП і порівнянні одержаного сигналу із задаючим $g(t)$.

Елемент порівняння визначає різницю цих сигналів, яка представляє собою похибку керування. Цей сигнал використовується для формування керуючої дії $x(t)$ на ОК. Отже, вихідна координата $y(t)$ є функцією як задаючого сигналу так і свого власного значення. Тобто

$$y(t) = F\{g(t), y(t)\}. \quad (5)$$

Перша складова вихідного сигналу формується по прямому каналу керування, а друга - по каналу зі зворотним зв'язком. Оскільки такий зв'язок забезпечується елементом порівняння, який визначає різницю задаючого і сигналу зворотного зв'язку, то такий зворотний зв'язок є від'ємним.

Тому такий принцип керування називають керуванням зі зворотним зв'язком. Оскільки в такій САК присутній замкнутий контур для проходження інформації, то такі системи називаються замкнутими САК.

Отже, замкнутою САК називають систему, в якій процес керування ОК залежить від результату керування.

Основними перевагами способу керування за відхиленням є:

- велика гнучкість і адаптивність до різних умов експлуатації САК;

- можливість зменшити вплив будь-яких зовнішніх збурень на об'єкт керування;
 - мала чутливість до змін параметрів регулятора і об'єкта керування.
- Недоліками таких САК є:
- неможливість повного усунення дії збурюючих впливів на вихідну величину об'єкта керування;
 - виникнення проблем зі стійкістю при спробах збільшення коефіцієнта підсилення системи.

Комбінований принцип керування. Сумісне використання принципу керування за збуренням і за відхиленням називається принципом комбінованого керування. В таких САК принцип керування за відхиленням реалізується за допомогою зворотного зв'язку, а принцип керування за збуренням - за допомогою компенсуючих зв'язків. Структура такої системи показана на рис. 12.

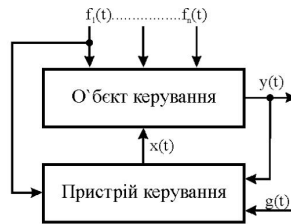


Рисунок 12 - Структура САК, побудованої на основі комбінованого принципу керування

При використанні принципу комбінованого керування керуюча дія на ОК визначається так:

$$x(t) = F\{g(t), y(t), f(t)\} \quad (6)$$

Преваги такого способу керування:

- повна компенсація похибок керування, які викликані основними збурюючими факторами;
- зменшення похибок керування, які викликані не вимірюваними збурюючими факторами;
- менша чутливість до вимірювання параметрів у порівнянні з розімкнутими САК;
- менш жорсткі вимоги до величини коефіцієнта передачі замкнутої САК, що зменшує проблему забезпечення стійкості системи.

Недоліки:

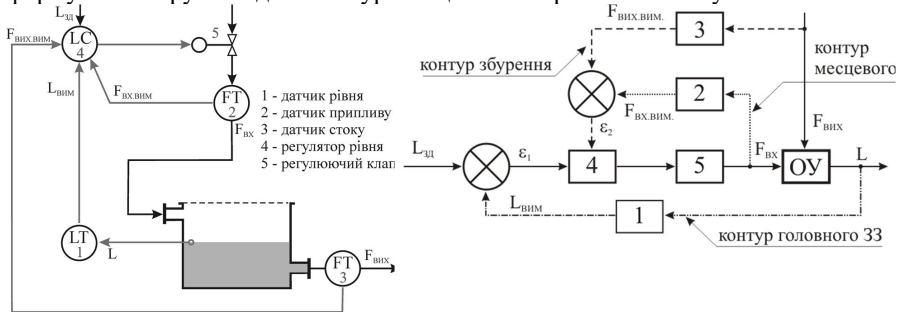
- конструктивна складність САК, яка обумовлена наявністю великої кількості каналів керування;
- складність налаштування САК, яка обумовлена тими ж причинами.

Розглянемо як приклад комбіновану багатоконтурну систему керування рівнем води в проточному баку системи водопідготовки (рис. 13). Метою керування є забезпечення постійного заданого значення рівня води у баку. Рівень $L(t)$ залежить від різниці керуючої дії - припливу $F_{ВХ}(t)$ і збурюючої дії -

стоку $F_{ВІХ}(t)$. Умовою досягнення мети керування є забезпечення рівності припливу і стоку :

$$F_{ВІХ}(t) = F_{ВІХ}(t) \quad (7)$$

Поточна величина рівня вимірюється рівнемірором 1 і регулятором 4 порівнюється із заданим значенням. Регулятор, виходячи зі знаку розузгодження ϵ_1 , збільшує або зменшує приплив води $F_{ВІХ}(t)$. Оскільки приплив залежить не лише від положення затвору регулюючого клапана, але і від інших параметрів, наприклад від перепаду тиску на клапані, для підвищення точності регулювання $F_{ВІХ}(t)$ вимірюється і використовується при формуванні керуючої дії в контурі місцевого зворотного зв'язку.



$x(t) = L_{зд}(t)$ – задане значення рівня води в баку; $y(t) = L_{ВІМ}(t)$ – поточне реальне значення рівня води в баку; $z(t) = F_{ВІХ}(t)$ – витрати води подачі в бак (приплив); $f(t) = F_{ВІХ}(t)$ – витрати води на виході з баку (стік); $\epsilon_1(t) = DL = L_{зд}(t) - L_{ВІМ}(t)$ – розузгодження в контурі загального зворотного зв'язку; $\epsilon_2(t) = DF = F_{ВІХ, ВІМ}(t) - F_{ВІХ, ВІМ}(t)$ – розузгодження в контурі місцевого зворотного зв'язку

Рисунок 13 - Комбінована багатоконтурна система керування рівня води в проточному баку системи водопідготовки

Рисунок 14 – Структурна схема комбінованого керування рівня води в проточному баку системи водопідготовки

Зміна стоку $F_{ВІХ}(t)$ порушує матеріальний баланс в системі, тобто є збурюючим впливом. Виміряне значення $F_{ВІХ}(t)$ використовується регулятором для компенсації збурення.

Структурна схема САК, що розглядається приведена на рис. 14.

Принцип адаптації. Самоналагоджувальні системи. Розглянуті принципи автоматичного керування довгий час були єдиними.

Проте успішний розвиток кібернетики дозволив застосувати в автоматичних системах новий принцип керування, званий принципом адаптації (приспособлення). Цей принцип керування закладений в роботу так званих самоналагоджувальних систем.

Автоматична система, що має властивість автоматично змінювати в процесі роботи характеристики або структуру регулятора з метою збереження заданих показників якості за довільно змінних зовнішніх умов, має назву *самоналагоджувальної*.

Самоналагоджувальна система складається з основної системи і додаткових пристроїв (рис. 15).

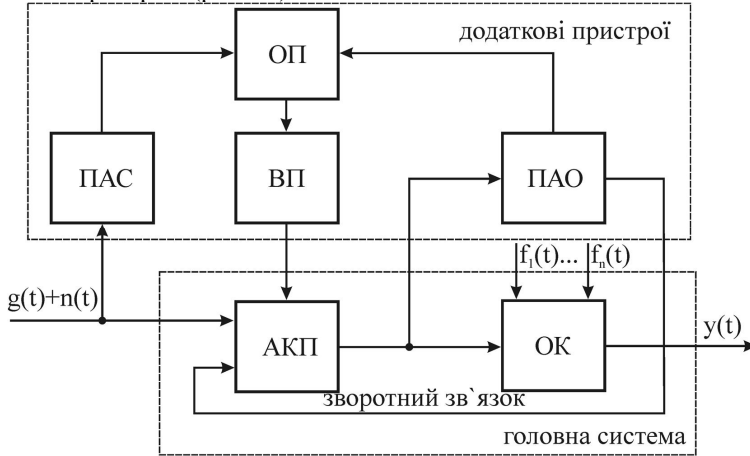


Рисунок 15 - Самоналагоджувальна автоматична система

Основна система побудована на основі принципу керування по відхиленню і включає об'єкт керування і автоматичний керуючий пристрій (АКП). На вхід системи разом з корисним сигналом $g(t)$ поступає перешкода $n(t)$. Окрім координатного збурення $f_k(t)$, на ОК діє параметрична дія (збурення) $f_n(t)$, при цьому динамічні характеристики ОК змінюються в широких межах.

Для досягнення необхідних показників якості процесу керування до основної системи підключені наступні додаткові пристрої, які створюють контур самоналаштування:

- пристрій аналізу вхідного сигналу (ПАС) оцінює властивості вхідного сигналу (швидкість і прискорення зміни) $g(t)$;
- пристрій аналізу об'єкту (ПАО) призначений для оцінки змін динамічних характеристик КО ;
- обчислювальний пристрій (ОП) визначає спосіб зміни характеристик основного керуючого пристрою (параметрів, структури або закону керування) на основі закладених в ньому критеріїв оптимальності системи і інформації, одержуваної від пристрою аналізу сигналу і об'єкту;
- виконавчий пристрій контуру самоналагоджування (ВП) виконує функцію налагодження керуючого пристрою відповідно до сигналів, одержуваних від ВП.

Дія самоналагоджування є функцією багатьох змінних:

$$V = f(g(t), y(t), n, U, t, \dots)$$

ЗАВДАННЯ ДО САМОСТІЙНОЇ ДОМАШНЬОЇ ПІДГОТОВКИ

1. Відновити знання по основним поняттям, що характерні для систем автоматичного керування (регулювання). [1, с. 23-28, 6, Практична робота № 01].
2. Відновити знання по класифікації САК. [6, лекції 2].
3. Відновити знання по математичному опису елементів і систем автоматичного керування. [1, с. 14-23, 6, Практична робота № 02].
4. Відповісти на контрольні запитання.

ПРОГРАМА ЗАНЯТТЯ

1. Вивчення основних теоретичних відомостей до практичного заняття.
2. Проведення поточного тематичного тестування за темою заняття.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Які принципи керування САК існують?
2. З яких основних мінімальних блоків складається будь-яка САК?
3. Яку функцію виконує пристрій керування в САК?
4. Які САК мають назву "розімкннутих", а які – "замкннутих"?
5. В чому особливість структурних схем САК побудованих за відхиленням?
6. В чому особливість структурних схем САК побудованих за збуренням?
7. В чому особливість структурних схем САК побудованих за комбінованим принципом?
8. Що таке головний зворотний зв'язок?
9. Що таке місцевий зворотний зв'язок?
10. Для чого використовується коло зворотного зв'язку в САК?
11. В чому різниця між головним і місцевим зворотним зв'язком?
12. Проаналізувати основні переваги і недоліки систем керування за відхиленням?
13. Проаналізувати основні переваги і недоліки систем керування за збуренням?
14. Проаналізувати основні переваги і недоліки систем керування за комбінованим принципом?
15. Навести приклади побудови систем автоматичного керування за відхиленням (збуренням, комбінованим принципом)

ТЕСТОВИЙ КОНТРОЛЬ ЗНАТЬ № 2

Питання № 1

Принцип керування за збуренням у спеціальній літературі по автоматизації має назву принципу

- 1) Гей-Люсака;
- 2) Понселе – Чиколєва;

- 3) Бойля – Маріюта;
- 4) Льєнара – Шипара.

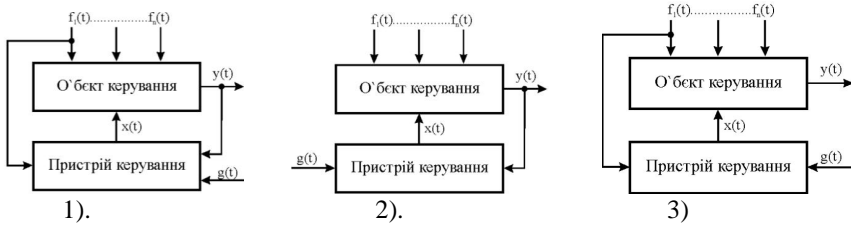
Питання № 2

Чи вірно твердження? Керування за збуренням систем автоматичного керування ґрунтується на принципі компенсації збурень.

- 1) так
- 2) ні

Питання № 3

Із запропонованих структур визначити структуру системи автоматичного керування побудовану на основі принципу керування за збуренням.



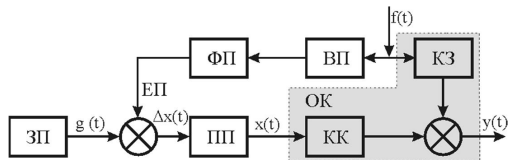
Питання № 4

Чи вірно твердження? При використанні способу керування систем автоматичного керування за збуренням обов'язково необхідно використовувати головний зворотний зв'язок по збуренню.

- 1) так
- 2) ні

Питання № 5

Чи вірно твердження? Запропонована функціональна схема системи автоматичного керування побудована по принципу керування за збуренням.



- 1) так
- 2) ні

Питання № 6

Винахідник І. І. Ползунов (1765 р.) використовував принципи керування за відхиленням в парових машинах для _____.

- 1) підтримки вогню;
- 2) підтримки постійної подачі дров;
- 3) підтримки температури води;

4) підтримки сталого рівня води в котлі.

Питання № 7

Із запропонованих структур визначити структуру системи автоматичного керування побудовану на основі принципу керування за відхиленням.



1).



2).



3).

Питання № 8

Чи вірно твердження? При використанні способу керування систем автоматичного керування за комбінованим принципом керування обов'язково необхідно використовувати зворотний зв'язок по зовнішньому збуренню та по відхиленню вихідної величини.

1) так

2) ні

Питання № 9

Чи вірно твердження? Комбінований принцип керування – це сумісне використання принципу керування за збуренням і принципу керування за відхиленням.

1) так

2) ні

Питання № 10

Чи вірно твердження? При використанні комбінованого принципу керування, принцип керування за відхиленням реалізується за допомогою зворотного зв'язку, а принцип керування за збуренням - за допомогою компенсуючих зв'язків.

1) так

2) ні

ПРАКТИЧНА РОБОТА

ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЛАНОК СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Мета заняття: оволодіти методикою визначення частотних характеристик (АЧХ, ФЧХ, АФЧХ і ЛАФЧХ) типових елементарних ланок автоматики і системи автоматичного керування

СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1. Загальні поняття про частотні характеристики

В умовах реальної експлуатації систем автоматичного регулювання (керування) часто виникає необхідність визначити реакцію на періодичні сигнали, тобто визначити сигнал на виході системи, якщо на один з входів подається періодичний сигнал гармонійної форми. Рішення цього завдання можливо отримати шляхом використання частотних характеристик системи.

Залежності, що зв'язують амплітуду і фазу вихідного сигналу з частотою вхідного сигналу, називають частотними характеристиками (ЧХ).

Аналіз частотних характеристик системи з метою дослідження її динамічних властивостей називається **частотним аналізом**.

Частотні характеристики можуть бути отримані експериментальним або аналітичним шляхом. При аналітичному визначенні вихідним моментом є одна з передаточних функцій САК (по відхиленню або за збуренням).

Можливе також визначення частотних характеристик виходячи з передаточних функцій розімкненої системи та передаточної функції за помилкою.

Якщо подати на вхід системи з передаточною функцією $W(s)$ гармонійний сигнал:

$$x(t) = U_m (\cos \omega t + j \sin \omega t)$$

де U_m - амплітуда коливаль,ь,

ω - частота коливаль,ь,

t - час,

то після завершення перехідного процесу на виході встановляться гармонійні коливання:

$$y(t) = Y_m e^{j(\omega t + \varphi)} = Y_m e^{j\omega t} e^{j\varphi}$$

з тією ж частотою ω , але іншою амплітудою Y_m і фазою φ , що залежать від частоти ω збурюючої дії. По них можна судити про динамічні властивості системи.

Підставимо вираз для $u(t)$ і $y(t)$ в рівняння динаміки

$$(a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + a_2 s^{n-2} + \dots + a_n s^0) y = (b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_n s^0) x$$

Враховуючи, що

$$sX = sU_m e^{j\omega t} = U_m j\omega e^{j\omega t} = j\omega x$$

а тому:

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

Аналогічні співвідношення можна записати і для лівої частини рівняння. Отримуємо:

$$s^n y = s^n Y_m e^{j\omega t} = Y_m (j\omega)^n e^{j\omega t} = (j\omega)^n y$$

По аналогії з передаточною функцією можна записати:

$$y = \frac{b_0 (j\omega)^m + b_1 (j\omega)^{m-1} + \dots + b_n (j\omega)^0}{a_0 (j\omega)^n + a_1 (j\omega)^{n-1} + \dots + a_n (j\omega)^0} x = W(j\omega) x$$

$W(j\omega)$, рівна відношенню вихідного сигналу до вхідного при зміні вхідного сигналу за гармонійним законом, називається частотною передаточною функцією. Легко помітити, що вона може бути отримана шляхом простої заміни s на $j\omega$ у виразі $W(s)$.

$W(j\omega)$ є комплексна функція, тому:

$$W(j\omega) = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)} = R(\omega) + jQ(\omega)$$

де $R(\omega)$ – дійсна частина частотної характеристики (ДЧХ);

$Q(\omega)$ – уявна частина частотної характеристики (УЧХ);

$A(\omega)$ – амплітудна частотна характеристика (АЧХ)

$\varphi(\omega)$ – фазова частотна характеристика (ФЧХ).

АЧХ дає відношення амплітуд вихідного і вхідного сигналів, ФЧХ - зсув по фазі вихідних величин відносно вхідних:

$$A(\omega) = \frac{U_m}{Y_m} = \sqrt{R(\omega)^2 + Q(\omega)^2}$$

Якщо $W(j\omega)$ зобразити у вигляді вектору на комплексній площині, то при зміні частоті ω :

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{R(\omega)}{Q(\omega)}$$

і ω від 0 до $+\infty$, його кінець буде викреслювати криву, що має назву *годографа* вектора $W(j\omega)$ або амплітудо – фазо - частотної характеристики (АФЧХ) (рис. 1.).

Гілку АФЧХ при зміні ω від 0 до $-\infty$ можна отримати дзеркальним відображенням цієї кривої відносно дійсної осі.

У теорії автоматичного керування широко використовуються логарифмічні частотні характеристики (ЛЧХ) (рис. 2.):

- логарифмічна амплітудна частотна характеристика (ЛАЧХ) $L(\omega)$
- логарифмічна фазова частотна характеристика (ЛФЧХ) $\varphi(\omega)$.

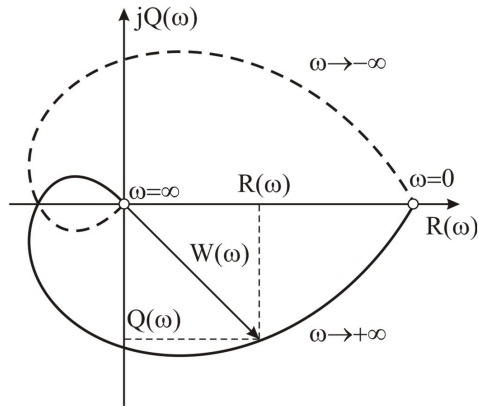


Рисунок 1 - Годограф вектора $W(j\omega)$ (АФЧХ).

Вони отримуються шляхом логарифмування передаточної функції. По осі абсцис відкладається частота ω в логарифмічному масштабі. Тобто одиничним проміжкам по осі абсцис відповідає зміна ω в 10 разів. Такий інтервал називається **декадою**. Оскільки $\lg(0) = -\infty$, то вісь ординат проводять довільно.

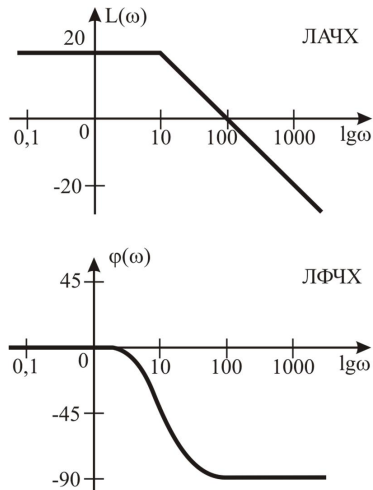


Рисунок 2 - Логарифмічні частотні характеристики

2. Частотні характеристики типових ланок

Якщо ми знаємо передаточну функцію ланки $W(s)$, то легко отримати всі його частотні характеристики. Для цього необхідно підставити в неї $j\omega$ замість s , і отримуємо АФЧХ $W(j\omega)$. Потім треба виразити з неї дійсну частотну характеристику ДЧХ $R(\omega)$ і уявну частотну характеристику УЧХ

$Q(\omega)$. Після цього перетворюємо АФЧХ в показну форму і отримуємо АЧХ $A(\omega)$ і ФЧХ $j(\omega)$, а потім визначаємо вираз ЛАЧХ $L(\omega) = 20\lg A(\omega)$ (ЛФЧХ відрізняється від ФЧХ тільки масштабом осі абсцис).

2.1. Безінерційна ланка

Передаточна функція: $W(s) = k$
 АФЧХ: $W(j\omega) = k$
 ДЧХ: $R(\omega) = k$
 РЧХ: $Q(\omega) = 0$
 АЧХ: $A(\omega) = k$
 ФЧХ: $j(\omega) = 0$
 ЛАЧХ: $L(\omega) = 20\lg k$

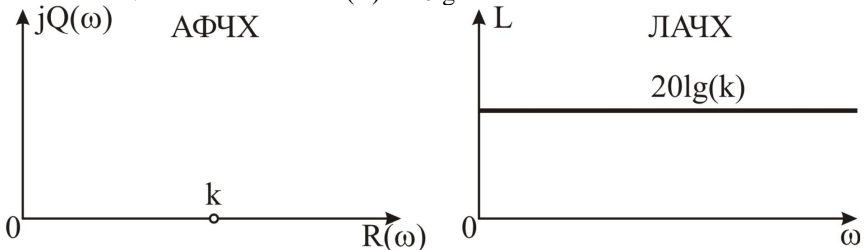


Рисунок 3 - АФЧХ і ЛФЧХ безінерційної ланки

Деякі частотні характеристики показані на рис. 3. Ланка пропускає всі частоти однаково зі збільшенням амплітуди в k разів і без зсуву по фазі.

2.2. Інтегруюча ланка

Передаточна функція: $W(s) = k / s$
 Розглянемо окремий випадок, коли $k = 1$, тобто $W(s) = 1 / s$.
 АФЧХ: $W(j\omega) = \frac{1}{j\omega} = \frac{1}{\omega} e^{-j\pi/2}$
 ДЧХ: $R(\omega) = 0$
 УЧХ: $Q(\omega) = -1 / \omega$
 АЧХ: $A(\omega) = 1 / \omega$
 ФЧХ: $j(\omega) = -\pi / 2$
 ЛАЧХ: $L(\omega) = 20\lg (1 / \omega) = -20\lg (\omega)$

Частотні характеристики показані на рис. 4. Всі частоти ланка пропускає із запізнюванням по фазі на $j = 90^\circ$. Амплітуда вихідного сигналу збільшується при зменшенні частоти і зменшується до нуля при зростанні частоти (ланка "завалює" високі частоти).

ЛАЧХ інтегруючої ланки являє собою пряму, що проходить через точку $L(\omega) = 0$ при $\omega = 1$. При збільшенні частоти на декаду ордината зменшується на $20 \lg 10 = 20$ дБ, тобто уклін ЛАЧХ дорівнює -20 дБ/дек (децибел на декаду).

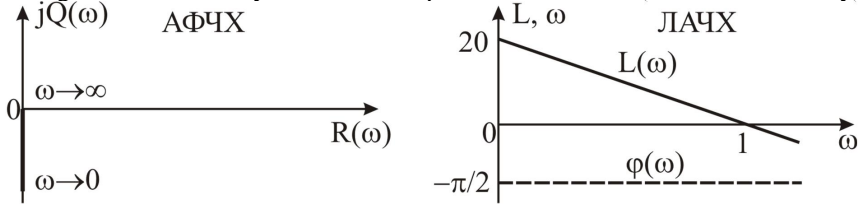


Рисунок 4 - Частотні характеристики інтегруючої ланки

2.3. Аперіодична ланка

Для аперіодичної ланки при $k = 1$ отримуємо такі вирази частотних характеристик.

Передаточна функція: $W(s) = \frac{1}{Ts+1}$

АФЧХ: $W(j\omega) = \frac{1}{j\omega T+1} = \frac{1-j\omega T}{1+(\omega T)^2}$

ДЧХ: $R(\omega) = \frac{1}{1+(\omega T)^2}$

УЧХ: $Q(\omega) = \frac{\omega T}{1+(\omega T)^2}$

АЧХ: $A(\omega) = 1 / \omega$

ФЧХ: $\varphi(\omega) = -\arctan(\omega T)$

ЛАЧХ: $L(\omega) = 20 \lg(1 / \omega) = -20 \lg(\omega)$

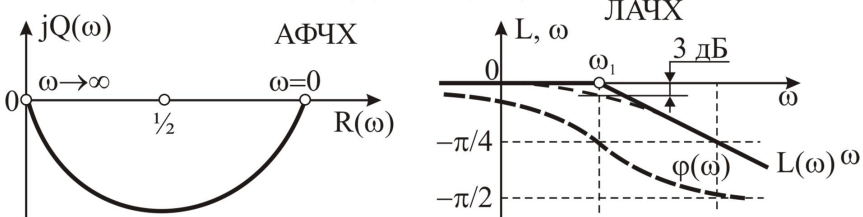


Рисунок 5 - Частотні характеристики для аперіодичної ланки

$$\varphi(\omega) = \varphi_1 - \varphi_2 = -\arctg(\omega T)$$

$$A(\omega) = \frac{A_1}{A_2} = \frac{\omega T}{\sqrt{1+(\omega T)^2}}$$

$$L(\omega) = 20 \lg(A(\omega)) = -10 \lg[1 + (\omega T)^2]$$

де: A_1 і A_2 - амплітуди чисельника і знаменника ЛФЧХ;

φ_1 і φ_2 - аргументи чисельника і знаменника.

Частотні характеристики показані на рис. 5. АФЧХ ланки - це напівколо радіусом $1/2$ з центром в точці $P = 1/2$.

При побудові асимптотичної ЛАЧХ враховують, що при $\omega < \omega_1 = 1/T$ можна знехтувати компонентою $(\omega T)^2$ у виразі для $L(\omega)$, тобто $L(\omega) \gg 10 \lg 1 = 0$. При $\omega > \omega_1$ нехтують одиницею у виразі в дужках, тобто $L(\omega) \gg -20 \lg(\omega)$.

Тому ЛАЧХ проходить вздовж осі абсцис до сполученої частоти, потім - під ухилом -20 дБ/дек. Частота ω_1 має назву сполученої частоти. Максимальна відміна реальних ЛАЧХ від асимптотичних не перевищує 3 дБ при $\omega = \omega_1$.

ЛФЧХ асимптотично прагне до нуля при зменшенні ω до нуля (чим менше частота, тем менше спотворення сигналу по фазі) і $\approx -\rho/2$ при збільшенні ω до нескінченності. Перетин в точці $\omega = \omega_1$ при $j(\omega) = -\rho/4$. ЛФЧХ всіх аперіодичних ланок мають однакову форму і можуть бути побудовані по типовій кривій з паралельним зсувом вздовж осі частот.

2.4. Правила побудови частотних характеристик елементарних ланок

До частотних характеристик належить комплексна передаточна функція $W(j\omega)$, яку можна отримати, замінивши s на $j\omega$ в передаточній функції в перетвореннях Лапласа.

Частотна передаточна функція $W(j\omega)$ є комплексною функцією від змінної кутової частоти ω . Її, як і будь-яке комплексне число, можна записати в алгебраїчній та показовій формах:

$$W(j\omega) = R(\omega) + jQ(\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$$

де $R(\omega)$ - дійсна частина частотної передаточної функції;

$Q(\omega)$ - уявна частина частотної передаточної функції;

$A(\omega)$ - модуль частотної передаточної або амплітудна частотна функція;

$\varphi(\omega)$ - аргумент частотної передаточної функції або фазова частотна функція.

На комплексній площині частотну передаточну функцію $W(j\omega)$ визначає вектор, довжина (модуль) якого дорівнює $A(\omega)$, а кут, утворений цим вектором з дійсною позитивною піввіссю, дорівнює $\varphi(\omega)$. Крива, яку описує кінець цього вектору при зміні частоти від 0 до нескінченності (годограф вектору $\overrightarrow{W(j\omega)}$), називається амплітудно-фазовою частотною характеристикою (АФЧХ).

Для визначення модуля та фази частотної передаточної функції на заданій частоті слід відповідну точку годографа з'єднати прямою з початком координат. Довжина відрізка, який отримано, відповідає у визначеному масштабі модулю, а фаза визначається кутом, утвореним цією прямою та позитивною піввіссю дійсних величин (рис. 1).

Дійсну частотну функцію $R(\omega) = \text{Re}\{W(j\omega)\}$ розраховують у такий спосіб:

$$R(\omega) = A(\omega) \cdot \cos \varphi(\omega).$$

Графік залежності R від ω називають дійсною частотною характеристикою (ДЧХ).

Уявну частотну функцію $Q(\omega) = \text{Im}\{W(j\omega)\}$ можна визначити так:

$$Q(\omega) = A(\omega) \cdot \sin j(\omega).$$

Графік залежності Q від ω називають уявною частотною характеристикою (УЧХ).

АЧХ визначається відношенням амплітуди вихідного сигналу до амплітуди вхідного гармонічного сигналу в усталеному режимі:

$$A = \frac{a}{b}$$

АЧХ визначається як модуль частотної передаточної функції:

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = \sqrt{R^2(\omega) + Q^2(\omega)}$$

Графік залежності A від ω називають амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ). АЧХ показує, як пропускає ланка сигнали різних частот. Оцінка пропускання робиться відносно амплітуд вихідної та вхідної величин.

ФЧХ визначається зсувом фази вихідного сигналу $j(\omega) = j$. ФЧХ визначається як аргумент частотної передаточної функції:

$$\arg W(j\omega) = \begin{cases} \arctg \frac{R}{Q}, & \text{якщо } R > 0, Q < 0 \\ \pi + \arctg \frac{R}{Q}, & \text{якщо } R < 0, Q \geq 0 \\ \pi - \arctg \frac{R}{Q}, & \text{якщо } R < 0, Q < 0 \\ \frac{\pi}{2}, & \text{якщо } R = 0, Q > 0 \\ -\frac{\pi}{2}, & \text{якщо } R = 0, Q < 0 \end{cases}$$

Графік залежності j від ω називають фазочастотною характеристикою (ФЧХ). Вона показує фазові зсуви, які вносить динамічна ланка на різних частотах. Оцінка пропускання робиться відносно амплітуд вихідної та вхідної величин.

3. Частотні характеристики розімкнутих одноконтурних САК

При дослідженні і проектуванні САК часто використовують АФЧХ, ЛАЧХ і ЛФЧХ розімкнених систем. Це пояснюється тим, що розімкнуті САК простіше досліджувати експериментально, ніж замкнуті. В той же час по них можна отримати вичерпну інформацію про поведінку даної САК в замкнутому стані.

Будь-яку багатоконтурну САК можна привести до одноконтурної. Розімкнена одноконтурна САК складається з ланцюжка послідовно з'єднаних динамічних ланок. Знаючи передаточну функцію розімкнутої САК, можна побудувати її частотну характеристику. І навпаки, знаючи частотну характеристику розімкненої САК, зняту, наприклад, дослідним шляхом, можна знайти її передаточну функцію. Передаточна функція розімкнутої

одноконтурної системи дорівнює добутку передаточних функцій окремих ланок:

$$W(s) = \prod_{i=1}^n W_i(s).$$

Замінивши в цьому виразі s на $j\omega$, отримуємо її:

АФЧХ

$$W(j\omega) = \prod_{i=1}^n W_i(j\omega) = \prod_{i=1}^n A_i(\omega) e^{j\varphi(\omega)},$$

АЧХ

$$A(\omega) = \prod_{i=1}^n A_i(\omega),$$

значить ЛАЧХ дорівнює сумі ЛАЧХ ланок:

$$L(\omega) = \sum_{i=1}^n L_i(\omega)$$

ЛФЧХ:

$$\varphi(\omega) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(\omega)$$

Таким чином, ЛАЧХ і ЛФЧХ розімкнutoї САК будують шляхом складання ЛАЧХ і ЛФЧХ ланок.

Для побудови ЛАЧХ і ЛФЧХ рекомендується такий порядок:

1. Розкладають складну передаточну функцію на множники, які є передавальними функціями типових динамічних ланок (порядок поліномів чисельника і знаменника не вище другого);
2. Обчислюють частоти окремих ланок, що з'єднуються, і будують асимптотичні ЛАЧХ і ЛФЧХ кожної елементарної ланки;
3. Шляхом підсумовування ЛАЧХ і ЛФЧХ ланок будують результуючі ЧХ.

ЗАВДАННЯ САМОСТІЙНОЇ ДОМАШНЬОЇ ПІДГОТОВКИ

1. Відновити знання з методики отримання частотних характеристик в загальному виді. [4, с. 82-86; 6, практична робота № 02].
2. Відновити знання по існуючим елементарним ланкам автоматики. [1, с. 48-74; 2, с. 208-222; 5. С. 248-261; 6, практична робота № 01].
3. Відповісти на контрольні запитання.

ПРОГРАМА ЗАНЯТТЯ

1. Вивчення основних теоретичних відомостей до практичного заняття.
2. Виконати завдання до практичної роботи.

ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ

ЗАВДАННЯ 1

1. Побудувати амплітудо – фазо - частотну характеристику ланки, що задана передаточною функцією $W(s) = \frac{k}{Ts+1}$, якщо $k = 1,3$; $T = 1,8$ с.

2. Побудувати для тієї ж ланки логарифмічну амплітудо – фазо - частотну характеристику.
3. Побудувати для тієї ж ланки фазо - частотну характеристику.
4. Встановити тип елементарної ланки.

ЗАВДАННЯ 2

1. Побудувати амплітудо – фазо - частотну характеристику ланки, що задана передаточною функцією $W(s) = \frac{k}{T_2^2 s^2 + \varepsilon T_1 s + 1}$, якщо $k = 1,3$; $T_1 = 1,8$ с; $T_2 = 0,95$ с; $\varepsilon = 0,8$.
2. Побудувати для тієї ж ланки логарифмічну амплітудо – фазо - частотну характеристику.
3. Побудувати для тієї ж ланки фазо - частотну характеристику.
4. Встановити тип елементарної ланки.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що називається частотними характеристиками?
2. Як отримати частотні характеристики теоретичним шляхом з певною передаточною функцією ланки?
3. Що таке і як отримати АФЧХ?
4. Що таке і як отримати ДЧХ?
5. Що таке і як отримати УЧХ?
6. Що таке і як отримати АЧХ?
7. Що таке і як отримати ФЧХ?
8. Що таке і як отримати ЛАЧХ?
9. Що таке і як отримати ЛФЧХ?
10. Як зміняться ЛАЧХ і ЛФЧХ ланки, якщо коефіцієнт підсилення зросте в 100 разів?
11. Що являє собою розімкнена одноконтурна САК?
12. Чому для побудови частотних характеристик розімкнутих одноконтурних САК зручно користуватися логарифмічними характеристиками?
13. Чим відрізняється ЛФЧХ від ФЧХ?
14. Як зміниться ЛАЧХ і ЛФЧХ розімкненої одноконтурної САК, якщо коефіцієнт підсилення збільшити в 10 разів?

ПРАКТИЧНА РОБОТА

СХЕМИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

Мета заняття: засвоїти основні види і типи схем, що використовують при розробках автоматичних систем керування технологічними процесами у виробництві

СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1. Загальні терміни і поняття щодо схем автоматики

Схеми автоматизації мають загальні терміни і поняття щодо схем (Додаток до ГОСТ 2.701-76).

Елемент схеми – складова частина схеми, яка виконує певну функцію у виробі і не може бути розділена на частини, які мають самостійне функціональне призначення (резистор, трансформатор, насос-розподільник, муфта та ін.).

Пристрій – сукупність елементів, що є єдиною конструкцією (блок, шафа, механізм). Пристрій може не мати у виробі певного функціонального призначення.

Функціональна група – сукупність елементів, що виконують у виробі певну функцію і не об'єднані в єдину конструкцію.

Функціональна частина – елемент, пристрій, функціональна група.

Функціональне коло – лінія, канал, тракт певного значення (канал звуку, тракт ПВЧ та ін.)

Лінія взаємозв'язку – відрізок лінії, що вказує на наявність зв'язку між функціональними частинами виробу.

Установка – умовне найменування об'єкта в енергетичних спорудах, на який випускається схема, наприклад головні (силові) кола.

2. Класифікація електричних схем

Для аналізу та розрахунку систем автоматичного керування використовують різного роду схеми. До схем, які найбільш використовуються в автоматизації, належать: функціонально-технологічні схеми, функціональні схеми САК та структурно-алгоритмічні схеми.

Схема - це вид графічного опису інформації виконана аз допомогою умовних позначень, що застосовуються для даного виду схем.

Визначення типу та сфери застосування схем автоматизації показано в таблиці 1.

Таблиця 1 - Характеристики типів схем

Тип схеми	Визначення типу	Сфера застосування
1. Структурна схема	Визначає основні функціональні частини виробу, їх призначення і взаємозв'язок	Розробляються при проектуванні виробів (установок) на стадіях, що є попередніми відносно розробки схем інших типів, використовуються для загального ознайомлення з виробом (установкою)
2. Функціональна схема	Визначає основні процеси, що протікають в окремих функціональних колах виробу (установки) чи у виробі (установці) в цілому	Використовуються для вивчення принципів роботи виробів (установок), а також при їх налаштуванні, контролі і ремонті
3. Принципова (повна) схема	Визначає повний склад елементів і зв'язків між ними, і, як правило, дає детальне уявлення про принципи роботи виробу (установки)	Служать основою для розробки конструкторської документації, наприклад схем з'єднань (монтажних). Використовуються для вивчення принципів роботи виробів (установок), а також при їх налаштуванні, контролі і ремонті
4. Схема з'єднань (монтажна)	Показує з'єднання складових частин виробу (установки) і визначає проводи, джгути, кабелі, якими здійснюються ці з'єднання, а також місця їх приєднання і вводу	Використовуються при розробці конструкторської документації, і насамперед креслень, які визначають прокладання і способи кріплення проводів, джгутів, кабелів у виробі (установці), а також для здійснення приєднань і при контролі, експлуатації і ремонті виробів (установок).
5. Схема підключення	Показує зовнішні електричні зв'язки між вимірювальними пристроями і засобами отримання первинної інформації з одного боку, щитами і пультами автоматизації — з іншого	Використовується при розробці конструкторської документації, а також для здійснення підключень виробів і при їх експлуатації.
6. Загальна схема	Визначає складові частини комплексу і з'єднання їх між собою	Використовується при ознайомленні з комплексами, а також при їх контролі і

Тип схеми	Визначення типу	Сфера застосування
	на місці експлуатації	експлуатації. За необхідності загальна схема може розроблятися на збиральну одиницю.
7. Схема розташування	Визначає відносне розташування складових частин виробу (установки), а за необхідності, також проводів, двигунів, кабелів, трубопроводів тощо	Використовується при розробці конструкторської документації, а також при експлуатації і ремонті виробів (установок)

В конструкторській документації схеми автоматизації кодуються буквами і цифрами в залежності від виду і типу схеми. Коди видів і типів схем автоматизації показано в таблиці 2.

Таблиця 2 - Коди видів і типів схем автоматизації

Вид схеми	Шифр	Тип схеми	Шифр
Електрична	Е	Структурна	1
Гідравлічна	Г	Функціональна	2
Пневматична	П	Принципова (повна)	3
Кінематична	К	З'єднань (монтажна)	4
Оптична	Л	Підключення	5
Вакуумна	В	Загальна	6
Газова	Х	Розташування	7
Автоматизації	А	Інші	8
Комбінована	С	Об'єднана	9

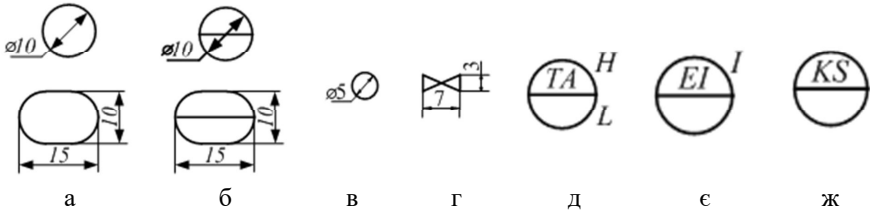
Функціонально-технологічні схеми. Функціонально-технологічна схема автоматизації є важливим проектним документом. Вона являє собою спрощену схему технологічного процесу, на якій зображені функціональні елементи автоматики та зв'язки між ними. При розробці схеми насамперед необхідно досконало вивчити технологічний процес, визначити складові частини об'єкта керування, їхнє функціональне призначення та зв'язки між ними. Далі, керуючись вимогами до автоматизації, потрібно з'ясувати призначення САК і встановити регульований параметр, на який спрямована мета керування, визначити функціональний склад системи регулювання і призначення її елементів. На схемі повинні бути зображені всі функціональні елементи системи.

Об'єкт керування на схемі автоматизації подають у вигляді спрощеного зображення основного та допоміжного технологічного обладнання, достатнього для розуміння принципу роботи обладнання та взаємозв'язків із засобами автоматики.

На функціональних схемах автоматизації з використанням умовних цифрових позначень, згідно ГОСТ 3464-63, показують трубопроводи з указуванням речовин, які по них протікають. Наприклад вода кодується як -1-1-; повітря -3-3-; кисень -5-5- та інші.

Елементи автоматики на схемі зображуються умовними графічними та літерними зображеннями згідно з ДСТУ Б А.2.4-16:2008. Зображення приладів (датчиків, виконавчих механізмів) розташованих на технологічному обладнанні показані на рис. 1. Зображення приладів, розміщених на щиті керування, відрізняються від тих, що встановлені безпосередньо на технологічному обладнанні, рисою (рис. 1, б, д, е, ж).

Датчики, вторинні прилади показують на схемах у вигляді кола діаметром 10 мм. Виконавчі механізми зображуються колом, діаметр якого 5 мм, регулюючі органи - двома трикутниками, що стикаються. Якщо необхідно вказати точне місце розташування елемента або точки вимірювання, то його (або її) показують колом діаметром 2 мм, яке з'єднують лінією із зображенням цього елемента.



а - датчик, який встановлений на місці; б - прилад, який встановлений на щиті, пульті; в - виконавчий механізм; г - регулюючий орган; д - прилад, який виконує функцію сигналізації верхньої та нижньої межі температури, встановлений на щиті, е - амперметр встановлений на щиті, ж – програмний пристрій, встановлений на щиті (реле часу).

Рисунок 1 - Умовні графічні зображення елементів автоматики:

Умовні графічні зображення елементів системи доповнюють. великими літерами латинського алфавіту (ДСТУ Б А.2.4-16:2008), які пишуть у верхній частині всередині умовного графічного зображення. При цьому перша літера означає параметр, на який реагує відповідний елемент (наприклад, Т – температура, М – вологість; L – рівень та інші), друга - уточнює призначення першої літери (наприклад, Q – інтеграція, підсумовування; F – співвідношення, частка; J – автоматичне перемикання), третя - функціональне призначення елемента (рис. 1, б). Значення кожної з літер латинського алфавіту наведено в додатку А.

Літеру Н використовують для позначення ручних операцій (літера має стояти на першому місці). Наприклад, літерою Н позначають кнопку дистанційного керування, літерами HS - електричний перемикач.

Функціональні ознаки приладів на схемах позначають літерами А, І, R, С, S, Н, L, які означають відповідно сигналізацію, індикацію, реєстрацію, регулювання, вмикання чи вимикання, верхню межу величини, нижню межу

величини. Якщо один і той же прилад має кілька функціональних призначень, то літери, якими вони позначені, записують у такій послідовності: IRCSA (показ-реєстрація, регулювання або керування вмикання, вимикання, перемикання - сигналізація). Літери Н, І проставляють за межами умовного графічного позначення (рис. 1, д, є).

Для конкретизації вимірюваної величини, наприклад, Е - електричної, праворуч від умовного графічного позначення показують її назву, наприклад, І - струм (рис. 1, є).

Часто функціональні ознаки приладів та засобів автоматизації можуть бути показані за допомогою літер Е – чутливий елемент, Т – дистанційна передача; К – станція керування; У – перетворення, обчислення, а функціональні ознаки перетворювачів сигналів і обчислювальних пристроїв наведені в додатку В. У цих випадках позначення всього приладу повинно складатися лише із двох літер. Перша з них означає величину, що вимірюється, а друга - функціональну належність приладу. Наприклад, ТЕ означає, що на схемі зображено первинний перетворювач температури, ТС - регулятор температури, ТУ - перетворювач температури.

Принцип побудови умовного зображення приладу наведений на рисунку 2.

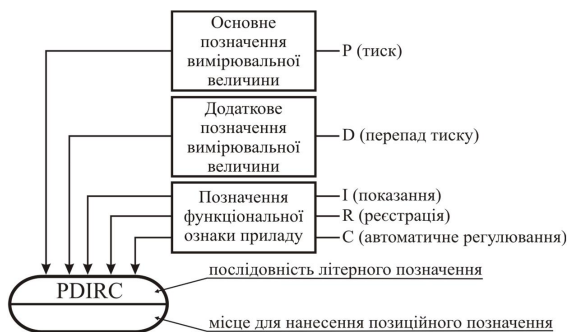


Рисунок 2 - Побудова умовного зображення приладу

На схемах автоматизації у нижній частині умовного графічного позначення під літерними позначеннями розмішують позиційне позначення приладів та засобів автоматизації (рис. 2). Цифра в позиційному позначенні вказує на номер комплекту, а мала літера - місце даного приладу в комплекті обладнання. Для нижнього ряду приладів позиційні номери повинні йти в порядку зростання зліва направо, для верхнього ряду подібна умова не є обов'язковою.

Зв'язок між окремими приладами на схемах автоматизації показують лініями, що можуть підходити до будь-якого місця умовного графічного позначення приладу або засобу автоматизації.

Схеми автоматизації можуть виконуватись як з умовним зображенням щитів або пультів керування, так і без них. Якщо схеми автоматизації складні,

то лінії зв'язку між елементами допускається розривати. При цьому обидва кінці ліній у місцях розриву нумерують однією і тією ж арабською цифрою.

На рис. 3 наведена схема автоматизації теплиці із зображенням щита керування. На схемі основна система регулювання температури повітря подана комплектом приладів під номером 2. Вона містить датчик температури, місце розташування якого вказане колом (позиційний номер елемента 2а), регулятор температури, встановлений на щиті (позиційний номер 2б), виконавчий механізм, з'єднаний з регулятором лінією зв'язку № 2, регулюючий орган та теплообмінник. Система контролю температури в теплиці представлена комплектом приладів № 4, система захисту електродвигуна вентилятора - комплектом № 6, система обліку теплоти - комплектом № 3. Комплект приладів № 5 зображає систему автоматичного регулювання вологості ґрунту. Ручне керування виконується комплектами приладів № 7, № 8.

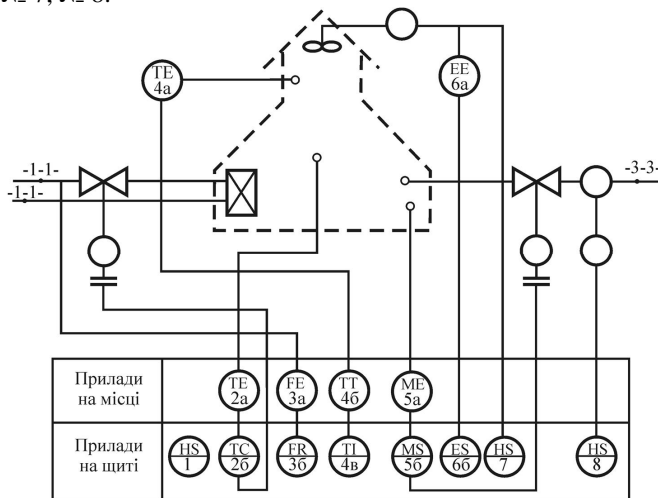
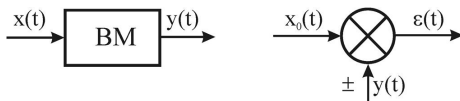


Рисунок 3 - Функціонально-технологічна схема автоматизації теплиці

Функціональні схеми САК. Система автоматичного керування складається з автоматичного керуючого пристрою (АКП) та об'єкта керування (ОК). АКП складається з окремих елементів, які виконують певні функції. До основних функціональних елементів АКП відносять наступні: задаючий елемент, сприймаючий елемент, елемент порівняння, підсилювальний елемент, виконавчий механізм. Крім цього, в більш складних АКП використовують коригуючі пристрої.

Кожен елемент виконує елементарну функцію, яка полягає в отриманні, перетворенні і передачі інформації у вигляді сигналів визначеної фізичної природи. Функціональні елементи представляють собою пристрої односпрямованої дії, тобто сигнал передають в одному напрямку - з входу на вихід.

У схемах функціональні елементи позначають прямокутником, усередині якого записано скорочену назву виконуваної функції (рис. 4).



а - функціонального елемента; б - елемента порівняння

Рисунок 4 - Умовні позначення

Для того, щоб скласти функціональну схему САК, потрібно виділити функціональні елементи, їхні вхідні і вихідні величини і представити умовними позначеннями, вказавши напрям передачі сигналу від одного елемента до іншого.

Для побудови функціональної схеми необхідно зобразити всі функціональні елементи САК. Відповідно до призначення кожного елемента його зв'язки з іншими елементами САК і напрямом кожного зв'язку показати стрілкою. Нанести на схему позначення регульованого параметра, на який спрямована мета керування, а також вхідні та вихідні сигнали функціональних елементів. Користуючись спеціальною та довідковою літературою, вибрати конкретні прилади для реалізації функціональних елементів системи та вказати їх великими літерами над відповідними елементами схеми.

Функціональна схема системи автоматичного регулювання температури повітря в теплиці наведена на рис. 5.

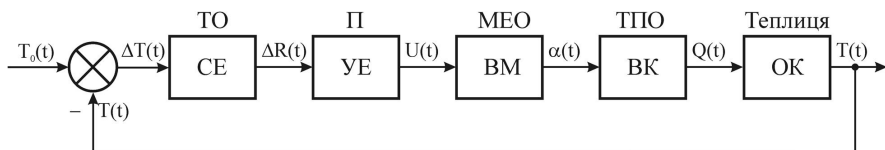


Рисунок 5 - Функціональна схема САК температури повітря в теплиці

Регульованим параметром в системі є температура повітря в теплиці $T(t)$. Приміщення теплиці - це об'єкт керування (ОК). Сприймаючим елементом є термометр опору ТО, за допомогою якого відхилення $\Delta T(t)$ температури повітря $T(t)$ від заданої температури $T_0(t)$ перетворюється в зміну опору датчика $\Delta R(t)$. Керуючим елементом є підсилювач П, який перетворює сигнал $\Delta R(t)$ в напругу $U(t)$, що подається на виконавчий механізм ВМ. Виконавчий механізм МЕО переміщує регулюючий орган (дросельний вентиль) на величину $a(t)$ і змінює кількість теплоти $Q(t)$, що надходить в теплообмінник ТПО водяного калорифера ВК, яким обігрівається теплиця.

Структурно-алгоритмічні схеми САК. Структурно-алгоритмічна схема є графічним зображенням динамічних властивостей функціональних елементів системи, яке описує математичну модель процесу керування. Вона показує, з яких типових динамічних ланок складається система і як вони з'єднані між собою. Структурно-алгоритмічну схему складають,

користуючись функціональною схемою і передаточними функціями окремих елементів системи. Елементи системи зображуються у вигляді прямокутників, а зв'язки між ними - лініями зі стрілками у відповідному напрямку. У графічні зображення елементів системи записують їхні передаточні функції (рис. 6).

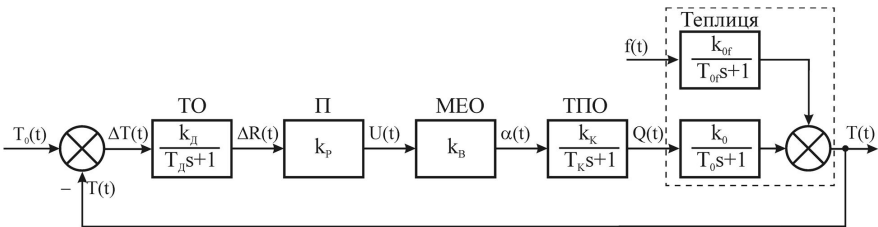


Рисунок 6 - Структурно-алгоритмічна схема САР температури повітря в теплиці

Принципові схеми автоматизації. Принципові електричні схеми визначають повний склад елементів і зв'язків між ними і, як правило дають детальне уявлення про принципи роботи виробу (установки). Схемами принциповими користуються для вивчення принципів роботи виробів (установок), а також при їх налазці, контролі і ремонті. Вони служать підставою для розробки інших конструкторських документів, наприклад, схем з'єднань (монтажних) і креслень

На принципових схемах використовують графічне зображення елементів, що представлено в додатку В.

Для запису в скороченій формі відомостей про елементи електричних схем існує ціла система літеро - цифрових позначень.

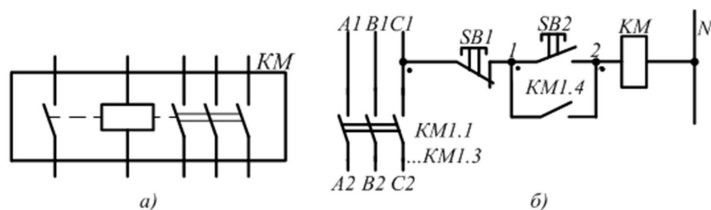
Обов'язковою частиною позиційного позначення є перша літера і цифра. Додаткова частина позначення - це літера, що вказує на функції елемента. Базові позначення деяких елементів наведені в додатку Г.

Для зручності читання схема має бути логічно послідовною і читатися зліва направо або зверху вниз.

Виконуючі принципові електричні схеми, слід керуватися такими нормативними документами: ГОСТ 2.702 – 75 і ГОСТ 2.708 – 81.

Принципові електричні схеми поділяють на поєднані і рознесені:

- на *поєднаній* схемі складові частини елементів зображують спільно у безпосередньому зв'язку один з одним і кожен елемент позначають своїм умовним символом. Перевага поєднаних схем полягає в їх наочності і простоті читання при невеликій кількості міжелементних зв'язків;
- на *рознесеній* схемі умовні позначення складових частин елементів зображують в різних місцях схеми.



а) – поєднаний; б) – рознесений

Рисунок 7 - Способи зображення умовних графічних зображень елементів на електричних схемах:

Принципові електричні схеми виконують за такими правилами:

1. Лист зі схемами заповнюють так: в лівій частині розміщують основну схему, потім графічний матеріал, що пояснює дію схеми (циклограми, діаграми замикань контактів та інше), в правій частині - текстовий матеріал.

2. Принципові схеми виконують строковим методом. При цьому графічні позначення елементів або їх складові частин, які входять в одне коло, зображують послідовно один за одним по прямій, окремі кола - поряд, створюючи паралельні (горизонтальні або вертикальні) строки.

3. Всі апарати потрібно зображувати, як правило, у відключеному стані, тобто при відсутності напруги у всіх колах схеми і зовнішніх механічних дій на апарати.

4. Контакти комутаційних приладів зображують так, щоб сила, яка потрібна для спрацювання, діяла на рухливий контакт зверху вниз при горизонтальному зображенні кіл схеми і зліва направо - при вертикальному.

5. Для позиційного позначення елементів рекомендується застосовувати двобуквені коди, але іноді можна позначити і однією буквою - загальним кодом виду. Наприклад, якщо в схемі є магнітний пускач і немає інших реле, то цей пускач можна позначити буквою К, хоча він має двобуквенний код КМ. Позиційне позначення на схемі проставляють біля умовного графічного зображення елементів (пристроїв) з правого боку або над ними.

6. Щоб поліпшити розуміння принципових електричних схем їх іноді розбивають на функціональні ділянки і збоку (справа) роблять написи, які пояснюють функціональне призначення кола або вказують, якій схемі технологічного устаткування належить це коло.

7. Лінії зв'язку між елементами повинні складатися з горизонтальних і вертикальних відрізків і мати найменше число зломів і перетинів. В деяких випадках допускається застосування похилих ліній зв'язку, довжину яких слід обмежувати.

Схема з'єднань. На схемах з'єднань зображують з'єднання складових частин установки або виробу, що автоматизуються, а також проводи, кабелі або трубопроводи. Указані схеми розробляються на основі схем автоматизації, принципових схем живлення, а також загальних виглядів щитів і пультів.

Схемами з'єднань користуються при виконанні монтажних та налагоджувальних робіт на об'єкті, а також у процесі його експлуатації.

Загальні правила виконання схем з'єднань такі:

- розробляють на один щит, пульт, станцію керування;
- усі типи апаратів, приладів та арматури, передбачені принциповою електричною схемою, повинні бути повністю відображені на схемі з'єднань;
- позиційне позначення приладів та засобів автоматизації, а також маркування ділянок кіл, що прийняті на принципових схемах, необхідно зберегти на схемі з'єднань.
- застосовують три способи виконання схем з'єднань: адресний, графічний і табличний.
- для перших двох, крім перерахованих правил, слід дотримуватись ще наступних:
- щит або шафу керування розгортають в одній площині, позначаючи лише ті їхні конструктивні елементи, на яких розміщуються прилади та засоби автоматизації; при цьому зберігають взаємне розміщення приладів та засобів автоматизації;
- прилади та засоби автоматизації зображують спрощено без збереження масштабу у вигляді прямокутників, над якими розташовують коло, розділене горизонтальною рисою навпіл, цифри над рисою вказують порядковий номер виробу (номери присвоюються по - панельно зліва направо і зверху вниз), а під рисою – позиційне позначення цього виробу (відповідно до принципової електричної схеми);
- при потребі показують внутрішню схему апаратів;
- для кількох реле, розміщених в одному ряду, внутрішню схему показують лише один раз (якщо вона у них одна й та ж сама);
- вивідні затискачі приладів умовно зображують колами, у середині яких показують їх заводське маркування; якщо у вивідних затискачів апаратів заводського маркування немає, їх маркують умовно арабськими цифрами, що обумовлюють у пояснюючих написах; маркування проводів і позначення затискачів на схемах з'єднань незалежні;
- платам, на яких розміщуються резистори, конденсатори та інші елементи, присвоюється лише порядковий номер (проставляється в колі над рисою); позиційне позначення елементів розміщують безпосередньо біля їх умовного графічного позначення.

Фрагмент електричної схеми з'єднань, виконаної адресним способом зображений на рис. 8.

Схеми підключень. Схеми підключень показують зовнішнє підключення апаратів, установок, щитів, пультів тощо. Їх виконують на основі схем автоматизації, принципових електричних, принципових живлення, специфікацій приладів і обладнання, а також креслень виробничих приміщень із розміщенням технологічного обладнання та трубопроводів. Схеми підключень використовують при монтажі проводок, за допомогою яких установку, прилад, апарат підключають до джерела живлення, щита, пульта та ін.

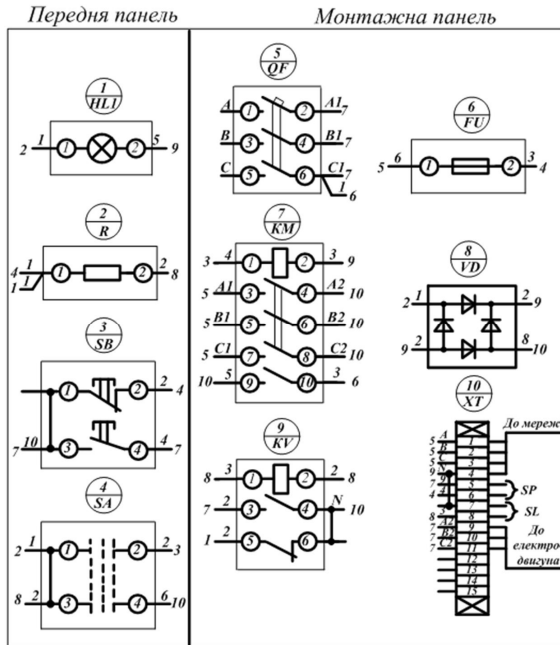


Рисунок 8 - Фрагмент електричної схеми з'єднань, виконаної адресним способом

Практично використовують два варіанти побудови схем підключень: графічний та табличний. Найбільш поширений графічний, при якому умовними графічними позначеннями показують: відбірні пристрої та первинні перетворювачі; щити, пульти та локальні пункти керування, контролю, сигналізації та вимірювання; позашитові прилади й засоби автоматизації; з'єднувальні та протяжні коробки, вільні коробки кінців термодпар; електропроводки та кабелі, що прокладаються поза щитами; вузли приєднання електропроводок до приладів, апаратів, коробок; запірну апаратуру, елементи для з'єднання та відгалуження; комутаційні затискачі розміщені поза щитами; захисне заземлення.

Шафи, пульти, окремі прилади та апарати зображують у вигляді прямокутників або кола, усередині яких розміщують відповідні надписи.

Зв'язки одного призначення на схемах підключення показують суцільною лінією і лише в місцях під'єднання до приладів, виконавчих механізмів та інших апаратів проводи розділяють, щоб привести їх маркування.

На лініях зв'язку, що означають проводи або кабелі, вказують номер проводки, марку, переріз та довжину проводів і кабелів (якщо проводка виконана в трубі, то необхідно також навести характеристику труби). Проводи джгути та кабелі показують лініями товщиною 0,4...1,0 мм.

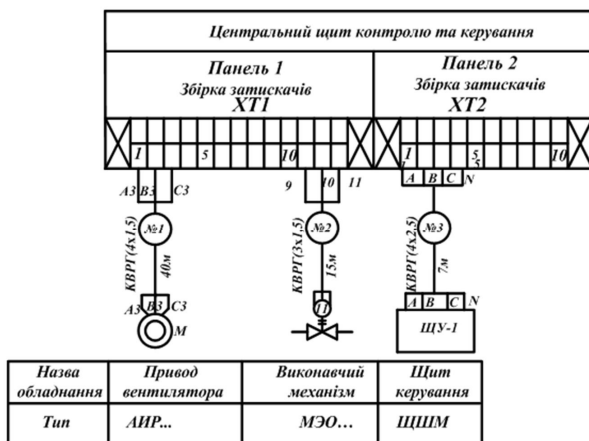


Рисунок 9 - Фрагмент схеми підключень

Схеми розташування. На схемі розташування зображують складові частини виробу, а за необхідності – зв'язки між ними, конструкцію, приміщення чи місцевість, на яких ці складові частини будуть розташовані.

Складові частини виробу зображують у вигляді зовнішніх обрисів чи умовних графічних позначень.

Проводи, групу проводів, джугти і кабелі зображують у вигляді окремих ліній чи зовнішніх обрисів.

Розташування графічних позначень, складових частин виробу на схемі має забезпечувати правильне уявлення про їх дійсне розміщення в конструкції, приміщенні, на місцевості.

При виконанні схеми розташувань допускається застосовувати різноманітні способи побудови (аксонометрія, план, умовна розгортка, розріз конструкції тощо).

На схемі розташування мають бути вказані:

- для кожного пристрою чи елемента, зображених у вигляді зовнішнього обрису, їх найменування і тип або позначення документу, на основі якого вони застосовані;
- для кожного елемента, зображеного у вигляді умовного графічного зображення, – його тип і позначення документу.

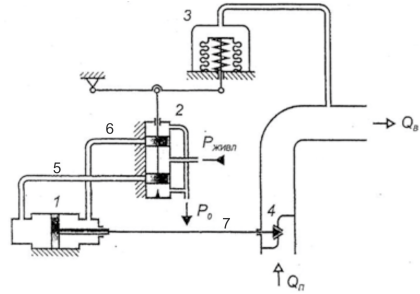
За великої кількості пристроїв та елементів рекомендується записувати ці відомості до переліку елементів (як для принципової схеми).

В такому випадку біля графічних пристроїв та елементів проставляють позиційні зображення.

ПРИКЛАД

Проаналізувати роботу принципової схеми автоматизації підтримки постійного тиску в трубопроводі та описати властивості елементів, з яких вона складається.

- 1- пневматичний циліндр
- 2- золотник
- 3- камера с регулятором тиску
- 4- керуючий клапан
- 5- трубопровід
- 6- трубопровід
- 5- шток пневматичного циліндру



Опис елементів принципової схеми

1. Пневматичний циліндр - це герметичний циліндр в якому встановлено поршень, що спроможний переміщуватися вліво або вправо під дією носія (газу), що поступає по трубопроводу 5 або 6.

2. Золотниковий перетворювач - це герметичний циліндр, в якому знаходиться система з двох поршнів. Якщо ця система переміщується вгору, робоча речовина під тиском потрапляє у верхню вихідну трубку, а нижня вихідна трубка з'єднується з атмосферним тиском ($p_1 = p_{\text{живл}}$, $p_2 = p_0$): якщо ж поршень золотника переміщується донизу, то все відбувається навпаки: $p_2 = p_{\text{живл}}$, $p_1 = p_0$. Золотникові перетворювачі бувають гідравлічні (робоча речовина - рідина під тиском) і пневматичні (робоча речовина - стиснене повітря).

3. Сильфонний перетворювач являє собою гофрований металевий стаканчик; переміщення його дна $y = l$ залежить від тиску газу або рідини $x = p$ усередині стаканчику.

Система автоматичного керування тиском газу в трубопроводі здійснюється таким чином: при зниженні тиску газу в трубопроводі природно зменшується тиск в камері 3, де розташовано регулятор тиску. Під дією пружини, що розтягується, коромисло почне свій рух вгору за рисунком і потягне за собою поршень золотника 2. Верхній клапан відкриває трубопровід 6 правої камери пневматичного циліндру, що керує клапаном 4 через шток 7. Газ під тиском $P_{\text{живл}}$, поступаючи в праву камеру починає переміщувати клапан пневмоциліндру 1 і тим самим відкривається подача газу в трубопроводі. При досягненні певного тиску в трубопроводі відповідно збільшиться тиск в камері 3 регулятора тиску, де за рахунок тиску буде стискуватися гофрований циліндр, перепускні клапани золотника 2 почнуть переміщуватися вниз. При цьому під тиском повітря $P_{\text{живл}}$, що буде поступати в ліву камеру циліндра 1

через трубопровід 5, буде переміщуватися поршень пневматичного циліндра 1, а це приведе до закриття клапану 4.

ЗАВДАННЯ ДО САМОСТІЙНОЇ ДОМАШНЬОЇ ПІДГОТОВКИ

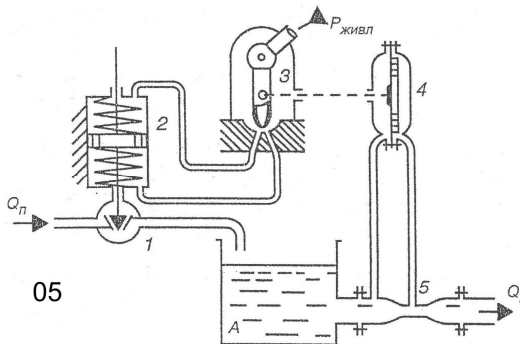
1. Відновити знання по елементарним ланкам САК. [6, практична робота лекції № 01].
2. Відновити знання по умовно графічному позначенню елементів електричних принципових схем. [ГОСТ 2.702 – 75].
3. Відповісти на контрольні запитання.
4. Рішити завдання за варіантом.

ПРОГРАМА ЗАНЯТТЯ

1. Вивчення основних теоретичних відомостей до практичного заняття.
2. Виконати завдання до практичної роботи.

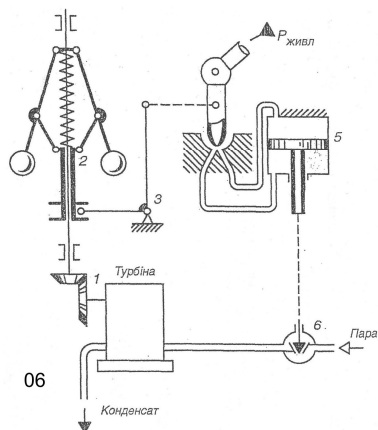
ЗАВДАННЯ 1

Проаналізувати роботу принципової системи автоматичного регулювання рівня води у резервуарі та описати властивості елементів, з яких вона складається.



ЗАВДАННЯ 2

Проаналізувати роботу принципової системи автоматичного регулювання швидкості обертання валу парової турбіни та описати властивості елементів, з яких вона складається.



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке схема взагалі?
2. Що таке елемент схеми? Навести приклади.
3. Що таке пристрій (установка)?
4. Що таке функціональна група (частина, коло)?
5. Які існують види схем автоматизації?
6. Які існують типи схем автоматизації і як вони шифруються?
7. Для чого складається структурна (функціональна) схеми автоматизації?
8. Які існують правила при складанні функціонально-технологічної схеми автоматизації?
9. За якими правилами складаються електричні принципові схеми автоматизації?
10. В чому різниця між поєднаною і рознесеною електричними принциповими схемами автоматизації?
11. Які існують правила при складанні схеми з'єднань?
12. Якими способами можна виконувати схеми з'єднань?
13. Які існують правила при складанні схеми підключень?
14. Що таке елементи автоматики і як вони позначаються на функціональній схемі автоматизації?
15. Для чого складаються функціональна і структурна алгоритмічна схема автоматизації?
16. Чим відрізняється функціональна від структурно - алгоритмічної схеми автоматизації?

ПРАКТИЧНА РОБОТА

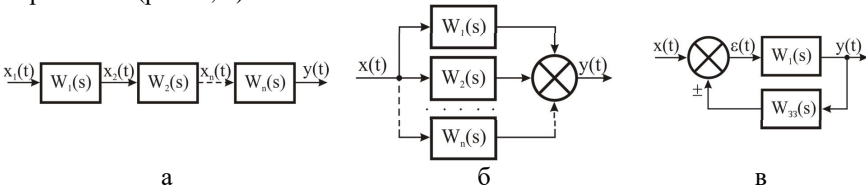
МАТЕМАТИЧНА БУДОВА МОДЕЛІ ЛІНІЙНОЇ САК. ВИЗНАЧЕННЯ ЗАГАЛЬНОГО РІВНЯННЯ РУХУ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Мета роботи: вивчення методів перетворення структурно – алгоритмічних схем автоматизації. Навчитися визначати передаточну функцію САК в розімкненому та замкнутому стані. Навчитися визначати загальне рівняння системи автоматичного керування з використанням методу графів (формули Мейсона).

СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1. Визначення рівняння загального руху САК методом еквівалентних перетворень

Різні структурно – алгоритмічні схеми можуть мати однакові передаточні функції, тобто бути динамічно еквівалентними. На всіх етапах еквівалентних перетворень передаточна функція системи в цілому не зміниться і не залежить від того, на скільки і на які елементарні ланки розбита система, і які структурні зв'язки існують між її ланками. Структурно - алгоритмічну схему будь - якої складності можна привести до еквівалентної одноконтурної схеми шляхом послідовних перетворень із збереженням динамічних характеристик системи, використовуючи відомі правила. В теорії автоматичного керування існують три основні схеми включення елементарних ланок – послідовне (рис. 1, а), паралельне (рис. 1, б) і зустрічно паралельне (рис. 1, в).



а – послідовне включення; б – паралельне включення; в – зустрічно-паралельне включення

Рисунок 1 – Схеми включення елементарних ланок

1. При послідовному з'єднанні n елементарних ланок (рис. 1, а) можуть бути замінені одною ланкою з передаточну функцією $W_E(s)$, рівною добутку передаточних функцій послідовно з'єднаних ланок, тобто

$$W_E(s) = w_1(s) \cdot w_2(s) \cdot \dots \cdot w_n(s) = \prod_{i=1}^n W_i(s). \quad (1)$$

2. При паралельному з'єднанні n елементарних ланок (рис. 1, б) можуть бути замінені однією ланкою з передаточною функцією $W_E(s)$, рівною сумі передаточних функцій послідовно з'єднаних ланок, тобто

$$W_E(s) = W_1(s) + W_2(s) + \dots + W_n(s) = \sum_{i=1}^n W_i(s) \quad (2)$$

3. При зустрічно-паралельному з'єднанні двох елементарних ланок (рис. 1, в) вони можуть бути замінені однією ланкою з передаточною функцією $W_E(s)$, що визначається за формулою:

$$W_E(s) = \frac{W_1(s)}{1 \pm W_1(s) \cdot W_{33}(s)} \quad (3)$$

в знаменнику знак "+" відноситься до від'ємного зворотного зв'язку, коли $x_{BX1} = x_{BX} - x_{ЗВ}$, зв'язку ;

в знаменнику знак "-" відноситься до позитивного зворотного зв'язку, коли $x_{BX1} = x_{BX} + x_{ЗВ}$, зв'язку ;

4. Зовнішній вплив f , що прикладений до виходу ланки (рис. 2, а) з передаточною функцією $W_1(s)$, можна перенести на її вхід (рис. 2, б), якщо розташувати між впливом і входом ланки додаткову ланку з передаточною функцією $W_3(s) = 1/W_1(s)$.

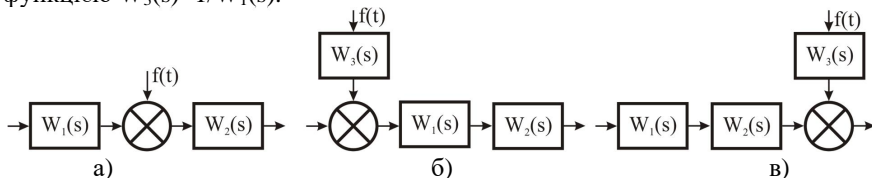


Рисунок 2 - Перенос суматора проти напрямку основного сигналу

Зовнішній вплив "f", що прикладений до входу ланки (рис. 2, а) з передаточною функцією $W_2(s)$, можна перенести на її вихід (рис. 2, в), якщо розташувати між впливом і виходом ланки додаткову ланку з тією ж передаточною функцією $W_3(s) = W_2(s)$.

5. Точку приєднання будь-якого структурного зв'язку до виходу ланки, що має передаточну функцію $W_1(s)$ (рис. 3, а), можливо перенести на його вхід, включивши в цей зв'язок додаткову ланку з тією ж передаточною функцією $W_4(s) = W_1(s)$ (рис. 3, б);

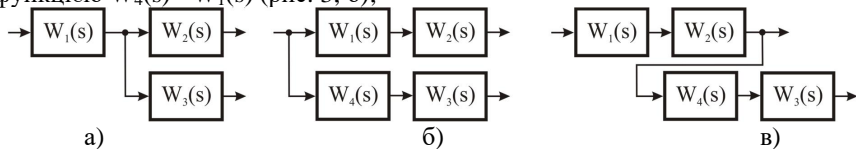


Рисунок 3 - Перенос вузла через елементарну ланку

Точку приєднання будь-якого структурного зв'язку до входу ланки з передаточною функцією $W_1(s)$ (рис. 3, а), можливо перенести на його вихід, включивши в цей зв'язок додаткову ланку з передаточною функцією $W_4(s) = 1/W_1(s)$ (рис. 3, в);

6. Суматори, елементарні ланки і вузли (точки розгалуження), що розташовані поруч, можна переставляти один з одним, не додаючи додаткових ланок.

При проведенні еквівалентних перетворень схем САК, потрібно позбуватися перехресних зв'язків. Для цього необхідно:

1. Кожне типове з'єднання ланок (послідовне, паралельне, зустрічно - паралельне) замінити еквівалентною ланкою за визначеними правилами, тобто таким чином, щоб одна схема замінювалася іншою із збереженням динамічних характеристик системи автоматичного керування.
2. Виконати перенос вузлів або точок розгалуження або суматорів. При цьому рекомендується використовувати визначені правила і прагнути до перестановки вузла через вузол, суматора через суматор для запобігання появи додаткових зв'язків.

ПРИКЛАД 1

Визначення загального рівняння руху САК шляхом еквівалентних перетворень структурно - алгоритмічної схеми.

Вихідна структурно - алгоритмічна схема автоматизації, представлена на рисунку 4, складається з 8 динамічних ланок, 2 суматорів S_1-S_2 , 2-х негативних кіл зворотного зв'язку, 3 вузлів і ліній зв'язку.

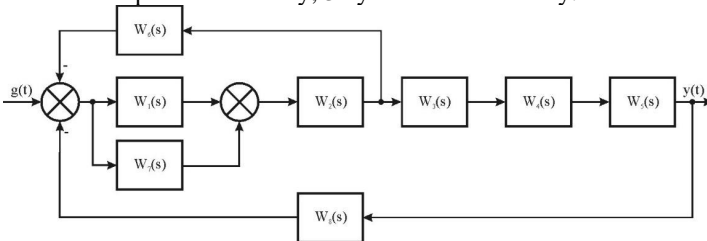


Рисунок 4 – Структурно – алгоритмічна схема автоматизації технологічного процесу

Подальші перетворювання зручніше проводити по етапам:

1-ий етап. Ланки $W_3(s)$, $W_4(s)$ і $W_5(s)$ включені послідовно, тому їх можна замінити однією ланкою $W_9(s)$. Ланки $W_1(s)$ і $W_7(s)$ включені паралельно, тому їх можна замінити однією ланкою $W_{10}(s)$.

$$W_9(s) = W_3(s) \times W_4(s) \times W_5(s)$$

$$W_{10}(s) = W_1(s) + W_7(s)$$

Структурно - алгоритмічна схема автоматизації прийме вигляд, що показаний на рис. 5

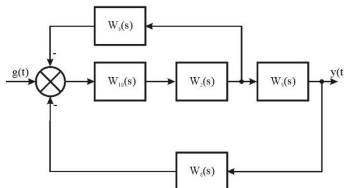


Рисунок 5 – Спрощена структурно – алгоритмічна схема автоматизації технологічного процесу після першого етапу

2-й-етап. Ланки $W_{10}(s)$ і $W_2(s)$ включені послідовно, тому їх можна замінити однією ланкою $W_{11}(s)$.

$$W_{11}(s) = W_{10}(s) \times W_2(s)$$

Структурно - алгоритмічна схема автоматизації прийме вигляд, що показаний на рис. 6.

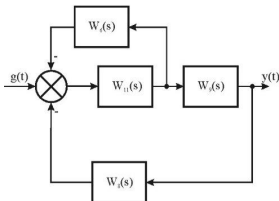


Рисунок 6 – Спрощена структурно – алгоритмічна схема автоматизації технологічного процесу після другого етапу

3-й-етап. Ланки $W_{11}(s)$ і $W_6(s)$ включені зустрічно-паралельно, тому їх можна замінити однією ланкою $W_{12}(s)$.

$$W_{12}(s) = \frac{W_{11}(s)}{1 + W_{11}(s)W_6(s)}$$

Структурно - алгоритмічна схема автоматизації прийме вигляд, що показаний на рис. 7.

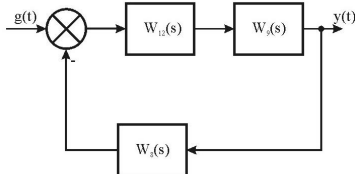


Рисунок 7 – Спрощена структурно – алгоритмічна схема автоматизації технологічного процесу після третього етапу

4-й-етап. Ланки $W_{12}(s)$ і $W_9(s)$ включені послідовно, тому їх можна замінити однією ланкою $W_{13}(s)$. Розрахункова структурно - алгоритмічна схема автоматизації прийме вигляд, що показаний на рис. 8.

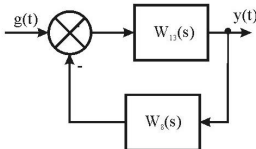


Рисунок 8 – Спрощена структурно – алгоритмічна схема автоматизації технологічного процесу після четвертого етапу

2. Визначення рівняння загального руху САК методом графів

В теорії автоматичного керування застосовують інший спосіб для здобуття загального рівняння руху (передаточної функції) складної

багатоконтурної системи, що полягає у використанні моделі системи у вигляді сигнального графа.

У загальному сенсі граф представляється як безліч вершин (вузлів), з'єднаних ребрами. У строгому визначенні графом називається така пара множин $G = (V, E)$, де V є підмножина будь-якої рахункової безлічі, а E - підмножина $V \times V$. (Рахункова безліч - безліч, елементи якої можливо пронумерувати натуральними числами).

Термін "граф" вперше з'явився в науковій літературі в 1936 році в роботах угорського математика Д. Кьоніга, хоча елементи теорії графів були відомі та широко використовувались ще у XVIII столітті, зокрема в роботах Л. Ейлера (рішення задачі про сім мостів Кенігсберга).

Метод графів застосовується в різних областях науки і техніки, наприклад:

- файлова система комп'ютера, ієрархія файлів в багатьох операційних системах має вигляд дерева;
- молекули усіх хімічних речовин можна зобразити у вигляді графа, де атоми є вершинами, а зв'язки між ними - ребрами;
- карта автомобільних шляхів (метро), причому кожна дорога може мати певне значення "ваги" (наприклад, щільність транспортного потоку);
- соціальні мережі, де кожна людина чи соціальна група є вершиною, а зв'язки між ними - ребрами;
- генеалогічні дерева;
- турнірні таблиці спортивних змагань;
- в біології та екології, наприклад ланцюги харчування, екосистеми, генетичні послідовності та карти, таксономічна ієрархія живих організмів тощо;
- в археології та геології графи використовуються у стратиграфії для вивчення геологічних пластів;
- будь-який виробничий процес - технологічна схема збагачення корисних копалин, будова будівель та ін.);
- розробка програмного забезпечення та комп'ютерні науки, де графи є зручним інструментом для зображення структур даних, блок-схем, потоків даних, схем баз даних та баз знань, кінцевих автоматів, схем комп'ютерних мереж та окремих сайтів, схем викликів підпрограм тощо, у багатьох алгоритмах пошуку та сортування;
- схемотехніка - топологія з'єднання елементів на друкованій платі або мікросхемі являє собою граф або гіперграф та інших науках.

На практиці існують такі різновиди кінцевих графів:

1. Простий (звичайний) - граф без петель та кратних ребер;
2. Мультиграф - граф без петель, але з кратними ребрами;
3. Псевдограф - граф з петлями та кратними ребрами;
4. Повний - граф, всі вершини якого з'єднані ребрами між собою;
5. Нуль-граф (пустий) - граф, у якого є вершини, але нема ребер, тобто всі вершини ізольовані.

Сигнальний граф дозволяє графічно описати лінійні зв'язки між змінними, він складається з *вузлів* (вершин) і направлених *гілок*, що їх з'єднують. При складанні сигнальних графів існує своя термінологія, що представлена на рисунку 9.

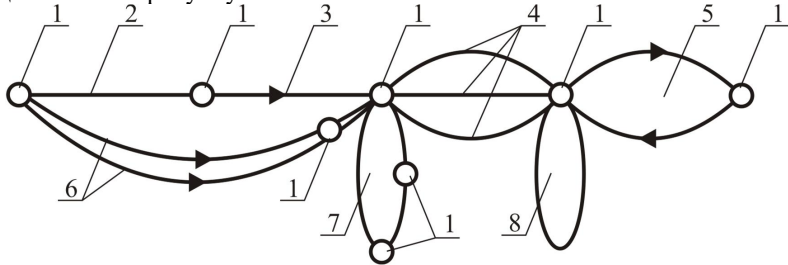


Рисунок 9 – Основні поняття сигнальних графів

Гілка відповідає блоку структурної схеми, вона відображає залежність між вхідною і вихідною змінними. Сума всіх сигналів, що входять у вузол, утворює відповідну цьому вузлу змінну. Послідовність гілок між двома вузлами називається *шляхом*.

Вершина, вузол (поз. 1, рис. 9) – точка, де можуть сходитись / виходити ребра і / або дуги. Вершина, яка є початковою рубіжною точкою дуги, називається її початковою вершиною, а вершина, яка є кінцевою граничною точкою цієї дуги – її кінцевою вершиною.

Ребро (поз. 2, рис. 9) – лінія, що з'єднує дві вершини графа і має такі властивості: кожне незамкнуте ребро містить рівно дві точки множини, які є граничними точками ребра; кожне замкнуте ребро містить тільки одну точку, тобто граничні точки збігаються: ребра не мають спільних точок.

Дуга (поз. 3, рис. 9) – орієнтоване ребро.

Кратні ребра (поз. 4, рис. 9) – декілька ребер, інцидентних одній і тій же парі вершин – зустрічаються в мультиграфах.

Контур (поз. 5, рис. 9) – замкнутий шлях, який починається і закінчується в одному і тому ж вузлі, причому жоден вузол не зустрічається на цьому шляху двічі – зустрічається в орграфі.

Кратні дуги (поз. 6, рис. 9) – декілька дуг, інцидентних одній і тій же парі вершин.

Цикл (простий цикл) (поз. 7, рис. 9) – простий шлях довжини не менше 1, який починається і закінчується в одній і тій же вершині.

Петля (поз. 1, рис. 9) – ребро, початок і кінець якого знаходяться в одній і тій же вершині.

Математичну модель системи керування можна представити за допомогою орієнтованих графів, що мають такі властивості:

1. Кожна дуга зображує ланку і характеризується оператором зображуваної нею ланки. Тому можна говорити про передаточну функцію, диференціальне рівняння, частотні і часові характеристики дуги.

2. Кожній вершині ставиться у відповідність одна із змінних. Якщо до вершини підходить тільки одна дуга, то відповідна їй змінна дорівнює вихідній величині дуги.

3. Якщо до вершини підходить декілька дуг, то відповідна їй змінна дорівнює сумі вихідних величин цих дуг. Вхідна величина дуги дорівнює змінній вершині, з якої ця дуга виходить. Якщо з вершини виходять кілька дуг, то вхідна величина всіх цих дуг одна і та ж.

Граф системи керування можна побудувати по її структурній схемі, і навпаки, за графом САК легко побудувати структурну схему. Однак, при побудові графу потрібно вихідну схему подати так, щоб у суматорі всі змінні склалися з позитивним знаком. Потім, за останньою схемою побудувати граф, дотримуючись таких правил:

1) кожен суматор замінюється вершиною, якій ставиться у відповідність вихідна змінна суматора, що замінюється;

2) кожна елементарна ланка замінюється дугою з оператором, рівним оператору ланки, що замінюється (передаточна функція);

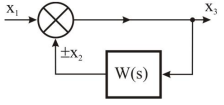
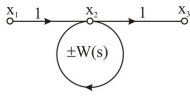
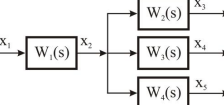
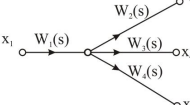
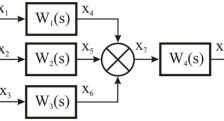
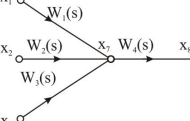
3) кожній змінній, в тому числі змінній, що позначає зовнішнє збурення, відповідає своя вершина;

4) якщо потрібно зобразити вихід однією з дуг (наприклад, дуги з передаточною функцією $W(s)$, що входить в загальну вершину, то слід ввести додаткову, кінцеву для цієї дуги вершину і з'єднати цю вершину з вихідною вершиною дугою з одиничним оператором.

Для перетворення існуючих структурних схем автоматизації використовують зображення елементів автоматики у вигляді сигнальних графів, деякі елементи представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 Основні зображення елементів структурних схем автоматики

З'єднання	Структурна схема	Сигнальний граф
1	2	3
Елементарна ланка		
Послідовне з'єднання		
Паралельне з'єднання		
Зустрічно- паралельне з'єднання		
Зустрічно паралельне з'єднання ланок з одиничною функцією в колі зворотного зв'язку		

1	2	3
Зустрічно-паралельне з'єднання ланок одиничною функцією в головному колі зворотного зв'язку		
Змішане з'єднання з розподілом основного сигналу		
Змішане з'єднання з додаванням основного сигналу		

За цими перетвореннями сигнальний граф однозначно відповідає структурній схемі.

Якщо відомо, що $X(s)$ і $Y(s)$ - вхідна і вихідна змінні системи відповідно, тоді для визначення загального рівняння руху САК (обчислення ПФ) системи керування по її графові можна скористатися формулою Мейсона:

$$\frac{X(s)}{Y(s)} = W(s) = \frac{\sum_{i=1}^N P_i \Delta_i}{\Delta}$$

де P_i - i -й шлях від входу до виходу;

N - кількість шляхів;

D - визначник графу;

D_i - додатковий множник для шляху.

Визначник графу отримуємо за формулою:

$$\Delta = 1 - \sum_{k=1}^K L_k + \sum_{m=1, q=1}^{M, Q} L_m L_q - \sum_{r=1, s=1, l=1}^{R, S, L} L_r L_s L_l + \dots$$

де $\sum_{k=1}^K L_k$ - сума коефіцієнтів передачі усіх окремих контурів;

$\sum_{m=1, q=1}^{M, Q} L_m L_q$ - сума результатів добутоків усіх можливих комбінацій з двох

контурів, що не перетинаються

$\sum_{m=1, q=1, l=1}^{R, S, L} L_r L_s L_l$ - сума результатів добутоків усіх можливих комбінацій з трьох контурів, що не перетинаються.

Додатковий множник для i -го шляху дорівнює визначникові графа, в якому прирівняні нулю коефіцієнти передачі контурів, що стосуються цього шляху.

ПРИКЛАД 2

Визначити загальне рівняння руху САК, використовуючи метод графів і формулу Мейсона.

Розглянемо приклад визначення передаточної функції багатоконтурної системи автоматичного керування технологічним процесом з використанням формули Мейсона для структури рис. 4, якій відповідає граф, показаний на рис. 10.

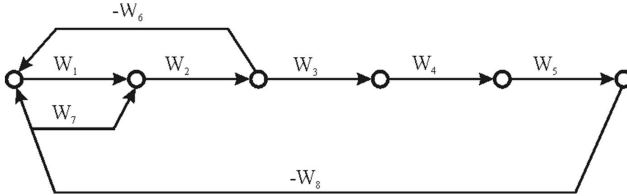
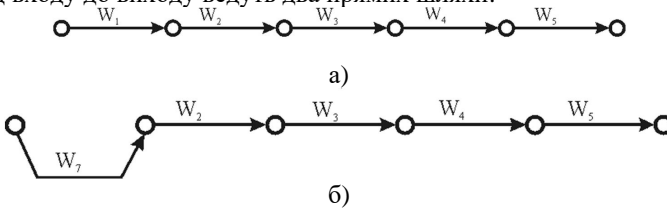


Рисунок 10 – Граф для запропонованої структурної схеми автоматизації

Від входу до виходу ведуть два прямих шляхи:



а) перша лінія; б) друга лінія;

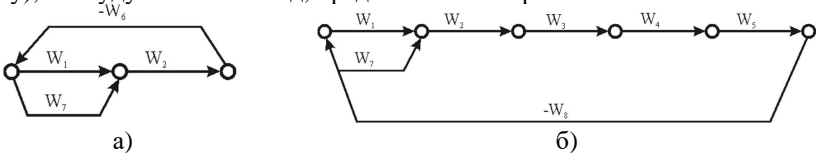
Рисунок 11 – Сигнальні графи для прямих шляхів проходження сигналу

Передаточні функції для прямих шляхів знаходяться як добуток передаточних функцій складових елементарних ланок:

$$W_{1\text{лн}} = W_1 \cdot W_2 \cdot W_3 \cdot W_4 \cdot W_5$$

$$W_{2\text{лн}} = W_7 \cdot W_2 \cdot W_3 \cdot W_4 \cdot W_5$$

В даній системі присутні два замкнутих кола (контури зворотного зв'язку), які будуть мати вигляд, представлений на рис. 12.



а) перший зворотний канал; б) другий зворотний канал

Рисунок 12 – Сигнальні графи для замкнутих кіл САК

Передаточні функції для замкнутих контурів знаходимо використовуючи формули для послідовного, паралельного та зворотно – паралельного з'єднання елементарних ланок:

$$W_{1\text{ЗВ.}} = -(W_1 + W_7) \cdot W_2 \cdot W_6$$

$$W_{2\text{ЗВ.}} = -(W_1 + W_7) \cdot W_2 \cdot W_3 \cdot W_4 \cdot W_5 \cdot W_8$$

Згідно формули Мейсона передаточна функція замкнутої САК визначається за виразом:

$$W_{\text{ЗАМК}} = \frac{W_1 \text{ ЛІНІЯ} + W_2 \text{ ЛІНІЯ}}{1 - W_{1\text{ЗВ.}} - W_{2\text{ЗВ.}}}$$

$$W_{\text{ЗАМК}} = \frac{(W_1 + W_7) \cdot W_2 \cdot W_3 \cdot W_4 \cdot W_5 \cdot W_8}{1 + (W_1 + W_7) \cdot W_2 \cdot W_6 + (W_1 + W_7) \cdot W_2 \cdot W_3 \cdot W_4 \cdot W_5 \cdot W_8}$$

Таким чином, використання сигнальних графів і вживання формули Мейсона дозволяє алгоритмізувати процес спрощення структурної схеми.

ЗАВДАННЯ ДО САМОСТІЙНОЇ ДОМАШНЬОЇ ПІДГОТОВКИ

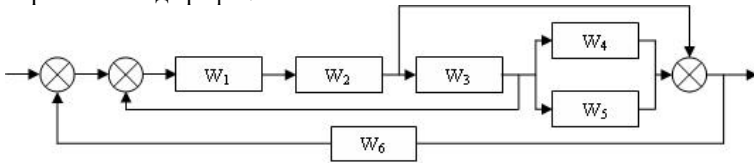
1. Відновити теоретичний матеріал практичної роботи за темою "Аналітичне визначення динамічних властивостей елементів і систем автоматичного керування.
2. Відновити знання з курсу математики про структуру графів

ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Вивчення основних теоретичних відомостей до практичного заняття.
2. Виконати завдання до практичної роботи.

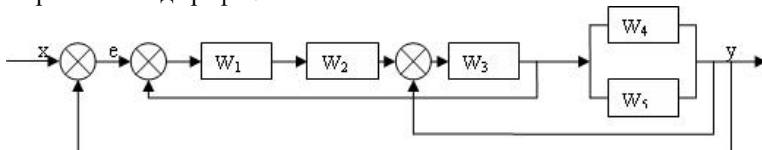
ЗАВДАННЯ 1

За отриманим варіантом структурно – алгоритмічної схеми автоматизації технологічного процесу визначити загальне рівняння руху САК (передаточну функцію) використовуючи два методи: метод еквівалентних перетворень і метод графів.



ЗАВДАННЯ 2

За отриманим варіантом структурно – алгоритмічної схеми автоматизації технологічного процесу визначити загальне рівняння руху САК (передаточну функцію) використовуючи два методи: метод еквівалентних перетворень і метод графів.



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Які існують загальні правила згорання структурно – алгоритмічних схем автоматизації?
2. Що означає термін "еквівалентне" перетворення в схемах автоматизації?
3. Який вигляд має передаточна функція еквівалентної ланки, якщо елементарні ланки з'єднанні послідовно?
4. Який вигляд має передаточна функція еквівалентної ланки, якщо елементарні ланки з'єднанні паралельно?
5. Який вигляд має передаточна функція еквівалентної ланки, якщо елементарні ланки з'єднанні зустрічно-паралельно?
6. Як впливає вид зворотного зв'язку (позитивний / негативний) на вигляд еквівалентної ланки при зустрічно-паралельному з'єднанні?
7. Яким чином еквівалентно перенести вузол через елементарну ланку по напрямку та проти дії основного сигналу?
8. Яким чином еквівалентно перенести суматор через елементарну ланку по напрямку та проти дії основного сигналу?
9. Які з'єднання елементів є паралельними, послідовними і зустрічно - паралельними?
10. Які впливи на САК мають назву задаючих і збурюючих?
11. Що таке передаточна функція САК?
12. Як визначається передаточна функція розімкненої САК, якщо відома передаточна функція замкнутої системи?
13. Що таке граф з математичної точки зору?
14. Хто перший з математиків заснував метод графів?
15. Навести приклади застосування методу графів в науці і техніці.
16. Поясніть поняття "вершина", "ребра", "підграф", "надграф", "орграф", "дуга", "петля", "контур", "кратні дуги", "кратні ребра", "цикл"?
17. Які існують особливості графа для систем автоматичного керування?
18. Як можна представити граф для послідовного, паралельного та зустрічно - паралельного з'єднання елементарних ланок автоматики?
19. Які існують правила побудови графа для систем автоматичного керування на основі структурної схеми автоматизації?
20. Які складові формули Мейсона для визначення передаточної функції замкнутої системи автоматичного керування?

ПРАКТИЧНА РОБОТА

ВИЗНАЧЕННЯ СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЗА КРИТЕРІЯМИ СТІЙКОСТІ

Мета заняття: ознайомитися з алгоритмом визначення стійкості систем автоматичного керування за алгебраїчними критеріями стійкості.

СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1. Загальні відомості

Автоматична система, призначена для керування будь-яким технологічним процесом або агрегатом, повинна бути працездатною, тобто втримувати параметри в таких межах, щоб не відбувалося істотних порушень технологічного процесу або роботи агрегату.

Працездатність системи визначається її стійкістю, під якою розуміється властивість повертання системи до стану сталої рівноваги після усунення причин, що її порушили.

У загальному випадку нестійкою є система, у якій у результаті деякого вхідного сигналу або збурювання регульована величина починає необмежено зростати.

Передумовою виникнення коливань у системі є наявність у замкнутому контурі системи двох елементів, здатних запасати енергію, а потім її видавати. В електричних колах такими елементами є ємність і індуктивність, у механічних ж системах ту ж роль грають маси, що рухаються, і пружини. Часто в електромеханічних системах одне середовище, що запасає енергію, є по своїй природі електричним, а інше - механічним.

Ілюстрацією поняття стійкості може служити система куля - поверхня в різних сполученнях рис. 1. В стані "1" зовнішні фактори дорівнюють нулю і куля знаходиться в покої. Якщо на кулю буде діяти зовнішня сила, то куля почне рухатися:

- рис. 1, а - система стійка в "малому", положення кулі "2", якщо зовнішня дія буде велика, то куля виявиться в положенні "3", а це вже нестійка система;
- рис. 1, б – незалежно від величини зовнішньої дії система стійка у "великому", положення кулі "2";
- рис. 1, в – незалежно від величини зовнішньої дії куля перейде з положення "1" в положення "2" і така система є нестійкою.

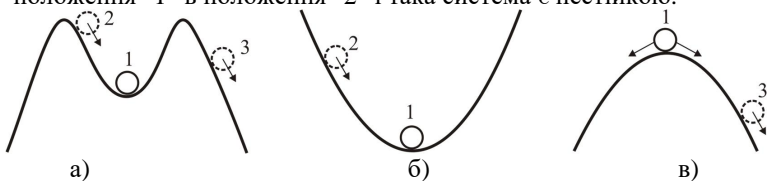


Рисунок 1 - Визначення стійких станів системи куля - поверхня

Стійкість є необхідною умовою працездатності САК, тобто система повинна нормально функціонувати й бути нечутливою до різного роду зовнішніх збурювань.

Під стійкістю систем автоматичного керування розуміється здатність системи підтримувати задане значення регульованого параметра з певною точністю і відновлювати його після закінчення перехідного процесу.

Отже, за характером перехідного процесу можна судити про стійкість системи (рис. 2). Якщо система стійка (рис. 2, а), то перехідна характеристика $\lim_{t \rightarrow 0} h(t) = 0$. Якщо система нестійка, тобто коли $\lim_{t \rightarrow \infty} h(t) = \neq$, то вона не повертається до стану рівноваги, з якого була виведена, і може віддалятися від стану рівноваги або робити неприпустимо більші коливання (рис. 2, б). При цьому відомо, що при невеликих збурюваннях система стійка, а при більших впливах може виявитися нестійкою.

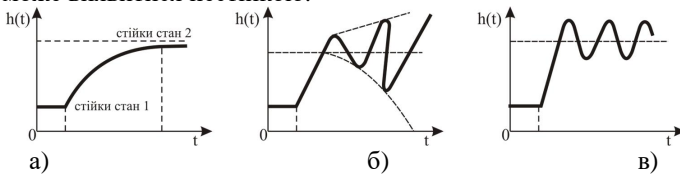


Рисунок 2 – Перехідні характеристики процесів

Оскільки реальні САК є нелінійними, то природно виникає питання, наскільки ми правочинні судити про стійкість реальних САК за їх лінійними математичними моделями. Відповідь на це питання подано в роботах О. М. Ляпунова:

- 1) якщо лінійна САК стійка, то стійка і реальна САК, при цьому ніякі відкинуті при лінеаризації члени не можуть змінити її стійкість;
- 2) якщо лінійна САК нестійка, то нестійка і реальна САК, при цьому ніякі відкинуті при лінеаризації члени не можуть змінити її стійкість;
- 3) якщо лінійна САК перебуває на границі стійкості, то судити по ній про стійкість реальної САК не можна, необхідно провести аналіз відкинутих при лінеаризації членів.

При розгляді питань стійкості, розглядаючи нелінійні системи, вводиться поняття стійкості в "малому", у "великому" і у "цілому".

Система стійка:

- в "малому", якщо відомо область стійкості, але невідомі границі цієї області,
- у "великому", коли визначені границі області стійкості;
- у "цілому", коли вона повертається до вихідного стану при будь-яких початкових відхиленнях, збурюваннях.

Стійкість "у цілому" для певного класу нелінійності називають "абсолютною" стійкістю.

Дослідження стійкості САК доцільно проводити в аналітичному виді, тобто шляхом знаходження коренів характеристичного рівняння. Не приводячи необхідних доказів на підставі теорем О. М. Ляпунова, слід

значити, якщо всі корені характеристичного рівняння розташовуються в лівій напівплощині комплексної площини, то лінійна система автоматичного керування є стійкою. Очевидно, що уявна вісь є границею стійкості. Система буде перебувати на границі стійкості при наявності нульового кореня, пари уявних коренів або нескінченно вилученого кореня ($p_1 = \infty$). Якщо в характеристичному рівнянні вільний член дорівнює нулю ($a_n = 0$), то це говорить про наявність нульового кореня, і така система називається нейтрально стійкою (рис. 2, в), тому що вона стійка не щодо керованої величини "у", а - щодо швидкості її зміни (dy/dt).

Очевидно, для визначення стійкості необов'язково знати значення коренів характеристичного рівняння, досить перекопатися в заперечності дійсних частин кореня. Методи, засновані на встановленні факту їхньої негативності, називаються *критеріями стійкості*.

2. Критерії стійкості

Критерій стійкості - це математичне формулювання умов, яким задовольняють коефіцієнти характеристичного рівняння стійкої системи.

У теорії автоматичного регулювання найбільше поширення одержали алгебраїчні критерії Рауса, Гурвіца, Вишнеградського, Ляпунова-Шипара, Наймарка, Воронова, Євсюкова, частотні критерії Михайлова, Найквіста і критерії, засновані на використанні логарифмічних частотних характеристик розімкнутої системи. З математичної точки зору всі критерії стійкості еквівалентні.

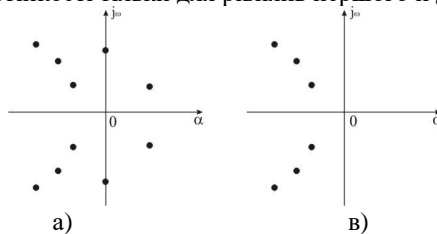
Якщо дослідження системи на стійкість ведеться по характеристичному рівнянню *замкнутої* системи

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

то необхідною (але не достатньою) умовою стійкості є позитивність всіх коефіцієнтів цього рівняння, тобто:

$$a_0 > 0; a_1 > 0; \dots a_{n-1} > 0; a_n > 0.$$

Це значить, що при позитивності всіх коефіцієнтів система може бути стійкою. Умови позитивності всіх коефіцієнтів характеристичного рівняння достатньо при оцінці стійкості тільки для рівнянь першого й другого порядку.



а - нестійка САК; б - стійка САК

Рисунок 3 - Розташування коренів характеристичного рівняння

3. Розрахунок стійкості САК за алгебраїчними критеріями

3.1 Критерій Рауса (1875 р.)

Застосування алгебраїчних критеріїв засноване на дослідженні комбінацій коефіцієнтів характеристичного рівняння, яким є *знаменник* передаточної функції *замкнутої* системи.

$$a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n = 0 \quad (2)$$

Таблиця Рауса складається з (n+1) рядків (n – найвищий степінь характеристичного рівняння) і складається за такими правилами:

- у першому рядку таблиці Рауса (3) розміщуються коефіцієнти з парними індексами, починаючи з a_0 ;
- у другому рядку - коефіцієнти з непарними індексами, починаючи з a_1 ;
- решта елементів таблиці Рауса визначається за співвідношеннями;
- відсутні елементи замінюються нулями.

$$R = \begin{pmatrix} a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & \dots \\ a_1 & a_3 & a_5 & a_7 & \dots \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & \dots \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & a_{n4} & \dots \end{pmatrix} \quad (3)$$

Для 3-го рядку визначається коефіцієнт $l_1 = a_0/a_1$, який буде постійним тільки для цього рядку. Коефіцієнти a_{31} , a_{32} та інші цього рядку визначаються за виразами:

$$a_{31} = a_2 - a_3 \cdot l_1, \quad a_{32} = a_4 - a_5 \cdot l_1$$

Правило просте - для коефіцієнта a_{31} обирається коефіцієнт a_2 ("хід конем") і обирається a_3 , який розташовано по діагоналі відносно a_{31} .

Для 4-го рядку визначається коефіцієнт $l_2 = a_1/a_{31}$, який буде постійним тільки для цього рядку. Коефіцієнти a_{41} , a_{42} та інші цього рядку визначаються за виразами:

$$a_{41} = a_3 - a_{32} \cdot l_2, \quad a_{42} = a_5 - a_{33} \cdot l_2$$

Інші рядки заповнюються аналогічно за тим же алгоритмом.

Характеристичне рівняння відповідає стійкій системі, якщо всі члени першого стовпця таблиці Рауса додатні, якщо хоча б один член має від'ємний знак, то система не стійка, а якщо хоча б один член має нульове значення, то система знаходиться на межі стійкості.

ПРИКЛАД 1

Визначити стійкість САК за критерієм Рауса, якщо відома передаточна функція замкнутої системи:

$$W_{\text{зам}}(s) = \frac{18s^3 + 19s^2 + 21s + 24}{13s^4 + 17s^3 + 19s^2 + 24s + 126} \quad (4)$$

Характеристичним рівнянням в даному випадку буде знаменник передаточної функції, який прирівнюється до нуля:

$$G(s) = 13s^4 + 17s^3 + 19s^2 + 24s + 126 = 0 \quad (5)$$

Максимальний степiнь характеристичного рiвняння $n = 4$, тому потрiбно скласти таблицю з 5 рядкiв. Пiсля розрахункiв отримуємо таблицю Рауса:

$$R = \begin{vmatrix} 13 & 19 & 126 & 0 \\ 17 & 24 & 0 & 0 \\ 0,64 & 126 & 0 & 0 \\ -3286,4 & 0 & 0 & 0 \\ 126 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Висновок: Згiдно критерiю Рауса САК, що описується характеристичним рiвнянням (4), є нестiйкою оскiльки коефiцiєнт 3-го рядка вiд'ємний.

3.2 Критерiй Гурвица (1895 р.)

Для визначення стiйкостi за алгебраїчним критерiєм Гурвица необхідно скласти симетричну матрицю з (6) n рядкiв i n стовпцiв (n – найвищий степiнь характеристичного рiвняння). Матриця складається з коефiцiєнтiв характеристичного рiвняння (знаменник) передаточної функцiї замкнутої системи таким чином:

- всi коефiцiєнти вiд a_1 до a_n розташовуються по головній дiагоналi в порядку зростання iндексиv;
- над головною дiагоналлю записуються коефiцiєнти iз зростаючими iндексами;
- пiд головною дiагоналлю записуються коефiцiєнти з iндексами, що спадають;
- на мiсцi коефiцiєнтiв, iндекси яких бiльше n i менше нуля, проставляються нулi.

Наприклад складемо матрицю для характеристичного рiвняння 5-го степеня.

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & a_5 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & a_3 & a_5 \end{vmatrix} \quad (6)$$

Пiсля складання матрицi необхідно знайти визначники: $D_1, D_2, \dots, D_{n-1}, D_n$.

Згiдно критерiю Гурвица замкнута система є стiйкою, якщо всi дiагональнi визначники матрицi Гурвица додатнi, якщо хоч один визначник буде вiд'ємним, то така система - не стiйка, якщо хоч один визначник буде дорiвнювати нулю – така система знаходиться на межi стiйкостi

ПРИКЛАД 2

Визначити стiйкiсть САК за критерiєм Гурвица, якщо вiдома передаточна функцiя замкненої системи (4).

Характеристичним рівнянням в даному випадку буде знаменник передаточної функції, який прирівнюється до нуля (5).

У нашому випадку характеристичне рівняння - четвертого порядку (n=4), тому матриця Гурвіца складається таким чином:

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 \end{vmatrix} \quad (7)$$

Підставивши числові значення, отримуємо:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 17 & 24 & 0 & 0 \\ 13 & 19 & 126 & 0 \\ 0 & 17 & 27 & 0 \\ 0 & 13 & 19 & 126 \end{vmatrix} \quad (8)$$

Визначимо всі визначники і отримуємо:

$$\Delta_1 = a_1 = 17 > 0$$

$$\Delta_2 = a_1 \cdot a_2 - a_0 \cdot a_3 = 11 > 0$$

$$\Delta_3 = a_3(a_1 \cdot a_2 - a_0 \cdot a_3) - a_4 \cdot a_1^2 = -36150 < 0$$

$$\Delta_4 = \Delta_2(a_3 \cdot a_4 - a_2 \cdot a_5) - (a_1 \cdot a_4 - a_0 \cdot a_5)^2 = -4554900 < 0$$

Висновок: задана система автоматичного керування за критерієм Гурвіца є не стійкою, тому, що третій (D_3) і четвертий (D_4) визначники менше нуля.

3.3 Критерій Льенара-Шипара (1914 р.)

У практичних розрахунках стійкість САК визначають по модифікованому критерію стійкості Гурвіца, який називають критерієм Льенара - Шипара і він формулюється так:

характеристичне рівняння відповідає стійкій системі, якщо при парному індексі характеристичного рівняння "n" додатні всі діагональні визначники матриці непарного порядку, а при непарному "n" - додатні всі діагональні визначники парного порядку, тобто

$$\text{при } n=2k \quad D_1 > 0, \quad D_3 > 0, \dots, D_{2k-1} > 0$$

$$\text{при } n=2k+1 \quad D_2 > 0, \quad D_4 > 0, \dots, D_{2k} > 0$$

Таким чином:

- для рівняння 3-го порядку $a_0s^3 + a_1s^2 + a_2s + a_3 = 0$ умова стійкості:

$$D_2 > 0$$

- для рівняння 4-го порядку $a_0s^4 + a_1s^3 + a_2s^2 + a_3s + a_4 = 0$ умова стійкості:

$$D_1 > 0; \quad D_3 > 0$$

- для рівняння 5-го порядку $a_0s^5 + a_1s^4 + a_2s^3 + a_3s^2 + a_4s + a_5 = 0$ умова стійкості:

$$D_2 > 0; \quad D_4 > 0$$

- для рівняння 6-го порядку $a_0s^6 + a_1s^5 + a_2s^4 + a_3s^3 + a_4s^2 + a_5s + a_6 = 0$ умова стійкості:

$$D_1 > 0; \quad D_3 > 0; \quad D_5 > 0$$

3.4 Критерій Неймарка (1947 р.)

В характеристичному рівнянні (знаменник) передаточної функції замкнутої системи автоматичного керування виконаємо заміну $s \rightarrow j\omega$, де $j = \sqrt{-1}$, і відокремимо дійсну і уявну частини з урахуванням, що $j^2 = -1$; $j^3 = -j$; $j^4 = 1$; $j^5 = j$:

$$W(j\omega) = R(j\omega) + Q(j\omega)$$

Очевидно, що поліном $R(j\omega)$ може мати члени тільки з парними степенями частоти ω , а поліном $Q(j\omega)$ - члени тільки з непарними степенями частоти ω .

Позначимо коефіцієнти $R(j\omega)$ через індекс "c", а коефіцієнти $Q(j\omega)$ - через "d", тобто запишемо поліноми у вигляді системи:

$$\begin{cases} R(\omega) = c_0\omega^n + c_1\omega^{n-1} + \dots + c_n \\ Q(\omega) = d_0\omega^n + d_1\omega^{n-1} + \dots + d_n \end{cases} \quad (9)$$

При цьому, якщо n - парне число, то всі c з не парними і d з парними індексами (враховуючи і d_0) дорівнюють нулю.

Потім складаємо таблицю, у верхній рядок якої запишемо всі коефіцієнти c , а в нижній всі коефіцієнти d так, щоб в одному стовпчику опинилися коефіцієнти з однаковими індексами:

$$\begin{array}{cccc} c_0 & c_1 & \dots & c_n \\ d_0 & d_1 & \dots & d_n \end{array} \quad (10)$$

Введемо співвідношення λ_1 першої цифри верхнього рядка до першої цифри другого рядка, яке відрізняється від нуля.

$$\lambda_1 = \frac{c_0}{d_1}, \quad (11)$$

і складемо нову таблицю, у верхній рядок якої будуть входити елементи, визначені за виразом:

$$c_i - \lambda d_{i+1}, \quad (12)$$

тобто елементи, отримані шляхом віднімання від попереднього елемента добутку розрахованого коефіцієнта λ на елемент нижнього рядка, що стоїть в другому рядку, а нижній рядок залишається без зміни.

Після перетворень перший стовпчик буде нульовим. І для нової таблиці введемо новий коефіцієнт m - співвідношення першої цифри таблиці після нуля другого рядка до першої цифри першого рядка.

Згідно критерію стійкості Неймарка система автоматичного керування буде стійкою, якщо всі коефіцієнти λ будуть від'ємними, а усі коефіцієнти m додатними.

ПРИКЛАД 3

Визначити стійкість САК за критерієм Неймарка, якщо відома передаточна функція замкнутої системи (4).

А характеристичне рівняння буде мати вигляд (5). Після підстановки в нього $s = j\omega$ отримуємо:

$$13(j\omega)^4 + 17(j\omega)^3 + 19(j\omega)^2 + 24(j\omega) + 126 = 0$$

або

$$(13\omega^4 - 19\omega^2 + 126) + j(-17\omega^3 + 24\omega) = 0$$

Отже

$$R = 13\omega^4 - 19\omega^2 + 126$$

$$Q = -17\omega^3 + 24\omega$$

Тому таблиця для характеристичного рівняння буде мати вигляд:

$$\begin{cases} 13 & 0 & -19 & 0 & 126 \\ 0 & -17 & 0 & 24 & 0 \end{cases} \quad (13)$$

Співвідношення ж першої цифри першого рядка до першої цифри другого рядка, що відрізняється від нуля буде мати вигляд:

$$\lambda_1 = \frac{13}{-17} < 0.$$

Отже нова таблиця буде мати вигляд:

$$\begin{cases} \left[13 - \left(-\frac{13}{17}\right) \cdot (-17) \right] & 0 & \left[19 - \left(-\frac{13}{17}\right) \cdot (24) \right] & 0 & 126 \\ 0 & -17 & 0 & 24 & 0 \end{cases} \quad (14)$$

Після перетворень і знищення першого нульового стовпчика отримуємо нову таблицю:

$$\begin{cases} 0 & -0,65 & 0 & 126 \\ -17 & 0 & 24 & 0 \end{cases}$$

Визначимо значення коефіцієнта μ – відношення першої цифри другого рядка таблиці після нуля до початкової цифри першого рядку.

$$\mu_1 = \frac{-17}{-0,65} > 0,$$

і складемо нову таблицю, в якій елементи першого рядка залишаються без змін, а елементи другого рядка замінюються на елементи, які представляють собою різницю між старим елементом і добутком коефіцієнту μ на елемент верхнього рядка, що стоїть в другому рядку. В результаті отримуємо таку таблицю:

$$\begin{cases} 0 & -0,65 & 0 & 126 \\ 17 - \frac{17}{0,65} \cdot (-0,65) & 0 & 24 - \frac{17}{0,65} \cdot (126) & 0 \end{cases}$$

або після перетворення

$$\begin{cases} 0 & -0,65 & 0 & 126 \\ 0 & 0 & -3271,4 & 0 \end{cases}$$

Визначимо коефіцієнт λ_2 як відношення першої цифри першого рядка до першої цифри нижнього рядка, яке відрізняється від нуля:

$$\lambda_2 = \frac{-0,65}{-3271,4} > 0$$

Висновок. задана система автоматичного керування за критерієм Неймарка є нестійкою, тому, що коефіцієнт $\lambda_2 > 0$.

3.5 Критерій Воронова (1965 р.)

За коефіцієнтами характеристичного рівняння, використовуючи критерії Рауса, Гурвіца і Неймарка, можна судити про стійкість САК, а розташування коренів характеристичного рівняння (полосів системи) дозволяє судити про якість перехідних процесів.

Класичні алгебраїчні критерії не завжди зручні при проектуванні систем, оскільки в цьому випадку зв'язок між коефіцієнтами математичної моделі і критеріями стійкості, що застосовуються, є досить складним. Тому виникає питання, чи існують такі критерії, в яких зв'язок між коефіцієнтами полінома і показниками стійкості був би простим. Позитивну відповідь на це питання було надано в роботах В. С. Воронова, який в 60-х роках минулого століття вперше отримав прості необхідні і достатні умови стійкості.

Якщо всі коефіцієнти характеристичного рівняння мають однакові знаки (будемо вважати їх позитивними), що є найпростішою необхідною умовою стійкості, сформульованою польським математиком Стодолою, то стійкість і якість системи керування за характеристичним поліномом можна оцінити за допомогою наступних показників:

Наближені частоти, сполучення:

$$\omega_k = \frac{a_{k-1}}{a_k}, k = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

Показники якості

$$\Omega_k = \frac{\omega_{k+1}}{\omega_k} = \frac{a_k^2}{a_{k-1}a_{k+1}}, k = 1, 2, \dots, n-1 \quad (16)$$

Показники стійкості

$$W_k = \frac{\omega_{k+2}}{\omega_k} = \Omega_k \Omega_{k+1} = \frac{a_k a_{k+1}}{a_{k-1} a_{k+2}}, k = 1, 2, \dots, n-2 \quad (17)$$

Значення (15) приблизно дорівнюють сполученим частотам на ділянках, де визначними є дійсні корені, що відповідають аперіодичним ланкам. Якщо $\Omega < 1,7 \dots 2$, то значення $\omega_{k,k+1} = \sqrt{\omega_k \omega_{k+1}}$ наближає сполучену частоту на ділянці, де визначеною є пара комплексно-сполучених коренів, відповідних до коливальної ланки.

Використовуючи метод математичної індукції, В. С. Воронов в 1965 році довів, що виконання нерівностей:

$$\frac{a_0}{a_2} < \frac{a_1}{a_3} < \dots < \frac{a_{k-1}}{a_{k+1}} < \dots < \frac{a_{n-2}}{a_n}, \quad (18)$$

є необхідною умовою стійкості. З використанням показників стійкості умова (18) запишеться у вигляді:

$$W_k > 1, k = 1, 2, \dots, n-2 \quad (19)$$

Невиконання хоча б однієї з нерівностей (19) є достатньою умовою нестійкості.

Виконання необхідної умови стійкості (19) ще не означає, що система буде стійкою. Тому В. С. Воронов запропонував також ряд достатніх умов стійкості. Найпростіша з них має вигляд:

$$W_k > 2,148, k = 1, 2, \dots, n-2 \quad (20)$$

З виразу (17) випливає, що умова (20) буде завжди виконуватися, якщо показники якості задовольняють обмеженням:

$$\Omega_k > \sqrt{2,148} = 1,466, k=1, 2, \dots, n-1 \quad (21)$$

Таким чином, (20) є достатньою умовою стійкості, що сформована по показникам якості.

На практиці звичайно вимагають, щоб система мала деякий запас стійкості і якості, тому поряд з умовами (20), (21) була запропонована умова стійкості із запасом:

$$W_k > 3, k=1, 2, \dots, n-2 \quad (22)$$

і умова стійкості і якості (якісної стійкості):

$$\Omega_k > \sqrt{3} = 1,732, k=1, 2, \dots, n-1 \quad (23)$$

В. С. Воронов показав також, що якщо всі $\Omega_k \geq 4$, то всі корені полінома будуть дійсними.

У спеціальній літературі наведені також і інші, трохи складніші достатні умови стійкості, що практично наближаються до необхідної й достатньої умови. Однак найбільш практичними є найпростіші умови (20...23), тому обмежимося їхнім розглядом.

ПРИКЛАД 4

Визначити стійкість САК за алгебраїчним критерієм стійкості Воронова, якщо характеристичне рівняння таке:

$$0,01s^6 + 0,5s^5 + s^4 + 6s^3 + 10s^2 + 4s + 3 = 0$$

$$\frac{a_0}{a_2} = 0,01 < \frac{a_1}{a_3} = 0,083 < \frac{a_2}{a_4} = 0,1 < \frac{a_3}{a_5} = 1,5 < \frac{a_4}{a_6} = 3,33$$

Визначимо показник стійкості:

$$W_k = 2,22 > 2,148,$$

Висновок: САК є стійкою, тому, що умова критерію Воронова виконується і стійкість достатня за показниками якості.

3.6 Критерій Євсюкова

Визначається величина k - швидкість спадання коефіцієнтів характеристичного рівняння:

$$k_1 = \frac{a_1}{a_0}; \quad k_2 = \frac{a_2}{a_1}, \quad \dots \quad k_n = \frac{a_n}{a_{n-1}}. \quad (24)$$

Необхідна умова стійкості полягає у виконанні наступних нерівностей:

$$\begin{cases} k_1 > k_3 > k_5 \dots \\ k_2 > k_4 > k_6 \dots \end{cases} \quad (25)$$

Визначається величина m - швидкість спадання коефіцієнтів k :

$$m_3 = \frac{k_3}{k_1}; \quad m_4 = \frac{k_4}{k_2}, \quad \dots \quad m_n = \frac{k_n}{k_{n-2}}. \quad (26)$$

Достатня умова стійкості полягає у виконанні наступних нерівностей:

$$\begin{cases} m_3 + m_4 - m_3 m_4 m_5 < 1 \\ m_4 + m_5 - m_4 m_5 m_6 < 1 \\ \vdots \\ m_i + m_{n+1} - m_i m_{n+1} m_{n+2} < 1 \end{cases}$$

ПРИКЛАД 5

Визначити стійкість САК за алгебраїчним критерієм стійкості Євсюкова, якщо характеристичне рівняння таке:

$$0,01s^6 + 0,5s^5 + s^4 + 6s^3 + 10s^2 + 4s + 3 = 0$$

$$k_1 = \frac{0,5}{0,01} = 50; \quad k_3 = \frac{6}{1} = 6; \quad k_5 = \frac{4}{10} = 0,4;$$

$$k_2 = \frac{1}{0,5} = 2; \quad k_4 = \frac{10}{6} = 1,7; \quad k_6 = \frac{3}{4} = 0,75$$

$$k_1 = 50 > k_3 = 6 > k_5 = 0,4$$

$$k_2 = 2 > k_4 = 1,7 > k_6 = 0,75$$

Необхідна умова стійкості виконується.

$$0,12 + 0,83 - 0,12 \cdot 0,83 \cdot 0,07 = 0,943 < 1$$

$$0,83 + 0,07 - 0,83 \cdot 0,07 \cdot 0,45 = 0,87 < 1$$

Достатня умова стійкості виконується.

ЗАВДАННЯ ДО САМОСТІЙНОЇ ДОМАШНЬОЇ ПІДГОТОВКИ

1. Відновити теоретичний матеріал за темою "Стійкість САК".
2. Ознайомитися з критерієм Вишнеградського [1, 2, 3]

ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Вивчення основних теоретичних відомостей до практичного заняття.
2. Виконати завдання до практичної роботи.

ЗАВДАННЯ 1

За заданою передаточною функцією замкненої системи автоматичного керування визначити стійкість за алгебраїчними критеріями Рауса і Воронова.

$$W(s) = \frac{2s + 1}{(3s + 0,5)(2s^2 + 12s + 16)}$$

ЗАВДАННЯ 2

За заданою передаточною функцією замкненої системи автоматичного керування визначити стійкість за алгебраїчними критеріями Гурвіца і Євсюкова.

$$(s) = \frac{8,2s + 2,4}{(6s + 1)(9s + 7,5)(1,6 + 0,3)}$$

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке стійкість САК?
2. Чому стійкість стали визначати за критеріями стійкості?
3. Що таке критерій стійкості?
4. Які Вам відомі алгебраїчні критерії стійкості?
5. В чому полягає суть алгебраїчного критерію стійкості Рауса?
6. В чому полягає суть алгебраїчного критерію стійкості Гурвіца?
7. В чому полягає суть алгебраїчного критерію стійкості Лъенара - Шипара?
8. В чому полягає суть алгебраїчного критерію стійкості Неймарка?
9. В чому полягає суть алгебраїчного критерію стійкості Воронова?
10. Які недоліки і переваги алгебраїчного критерію стійкості Вишнеградського?
11. Що таке характеристичне рівняння?
12. Які недоліки і переваги алгебраїчних критеріїв стійкості?

ПРАКТИЧНА РОБОТА

ВИЗНАЧЕННЯ СТІЙКОСТІ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЗА ЧАСТОТНИМИ КРИТЕРІЯМИ

Мета заняття: ознайомитися з алгоритмами визначення стійкості систем автоматичного керування за частотними критеріями стійкості

СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Будь-яка система повинна бути перш за все працездатною. Це означає, що вона повинна нормально функціонувати при дії на неї різних зовнішніх збурень. Іншими словами, система повинна працювати стійко.

Стійкість - одна з основних динамічних властивостей працездатності системи автоматичного керування. Під стійкістю лінійних САК розуміють її здатність повертатися до первинного рівноважного стану після зняття зовнішнього збурення, що викликало порушення рівноваги.

Нестійка система при скільки завгодно малих відхиленнях від сталої рівноваги не може повернутися в цей стан, а безперервно віддаляється від нього або здійснює неприпустимо великі коливання. Такі системи непрацездатні.

Частотні критерії стійкості - це графоаналітичні методи, що дозволяють по виду АФЧХ (годографу) систем автоматичного керування судити про їх стійкості.

Перевага цього методу при дослідженні систем - в його наочності та можливості експериментально визначити частотні характеристики як для окремих ланок, так і для системи в цілому. Це важливо в тому випадку, коли важко виявити або скласти диференціальні рівняння окремих ланок системи. Методика визначення стійкості по частотним критеріям справедлива для систем з розподіленими і зосередженими параметрами, а також для систем, що мають ланки з запізненням за часом. Частотні критерії можна використовувати для систем будь якого порядку. У практиці дослідження систем широко застосовують критерії Михайлова, Найквіста і логарифмічний.

Частотні критерії стійкості базуються на принципі аргументу.

1. Принцип аргументу

Запишемо характеристичний поліном САК у вигляді:

$$G(s) = a_0 \cdot (s - p_1) \cdot (s - p_2) \cdot \dots \cdot (s - p_n) = 0.$$

Його корені:

$$p_i = \alpha_i + j\omega_i = |p_i| e^{j \arg(p_i)},$$

де $\arg(p_i) = \arctg(\omega_i/\alpha_i) + k\pi$,

$$|p_i| = \sqrt{\alpha_i^2 + \omega_i^2}$$

Кожний корінь можна зобразити вектором на комплексній площині (рис. 5, а), тоді різниця $p - p_i$ зобразиться різницею векторів (рис. 5, б), де $p -$ будь яке число.

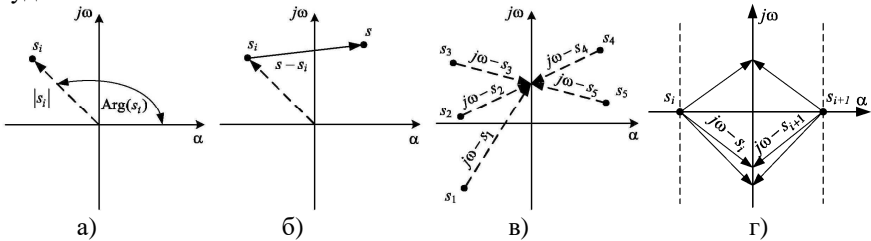


Рисунок 1 – До розкриття поняття принцип аргументу

Якщо змінювати значення p довільним чином, то кінець вектору $s - p_i$ переміщатиметься по комплексній площині, а його початок залишатиметься нерухомим, оскільки p_i - це конкретне незмінне значення.

В окремому випадку, якщо на вхід системи подавати гармонійні коливання з різною частотою ω , то $s = j\omega$, а характеристичний поліном приймає вигляд:

$$G(j\omega) = a_0 \cdot (j\omega - p_1) \cdot (j\omega - p_2) \dots (j\omega - p_n).$$

При цьому, кінці векторів $j\omega - p_i$ будуть знаходитися на уявній осі (рис. 5, в). Якщо змінювати ω від $-\infty$ до $+\infty$, то кожний вектор $j\omega - p_i$ буде обертатися відносно свого початку p_i на кут $+\pi$ для лівих і $-\pi$ для правих коренів (рис. 5, г).

Характеристичний поліном можна уявити як:

$$G(j\omega) = |G(j\omega)| e^{j \arg(G(j\omega))},$$

де $|G(j\omega)| = a_0 \cdot |j\omega - p_1| \cdot |j\omega - p_2| \dots |j\omega - p_n|$,

$$\arg(G(j\omega)) = \arg(j\omega - p_1) + \arg(j\omega - p_2) + \dots + \arg(j\omega - p_n).$$

Нехай z n коренів m - праві, а $n - m$ - ліві, тоді кут обертання вектору $G(j\omega)$ при зміні ω від $-\infty$ до $+\infty$ дорівнює:

$$\Delta \arg(G(j\omega)) \Big|_{\omega=-\infty}^{\omega=+\infty} = \sum_{i=1}^n \arg(j\omega - p_i) \Big|_{\omega=-\infty}^{\omega=+\infty} = (n - 2m)\pi,$$

або при зміні ω від 0 до $+\infty$ отримуємо:

$$\Delta \arg(G(j\omega)) \Big|_{\omega=0}^{\omega=+\infty} = \frac{\pi}{2} (n - 2m).$$

Звідси витікає правило: зміна аргументу вектору b при зміні частоти ω від $-\infty$ до $+\infty$ дорівнює різниці між числом лівих і правих коренів рівняння $G(s) = 0$, помножений на π , а при зміні частоти ω від 0 до $+\infty$ ця різниця множиться на $\pi/2$.

Це і є принцип аргументу. Він покладений в основу всіх частотних критеріїв стійкості.

1. Критерій Михайлова (1936 р.)

Критерій Михайлова засновано на використанні характеристичного рівняння замкнутої системи.

1. В поліномі характеристичного рівняння (знаменник передаточної функції замкнутої системи) змінюємо s на $j\omega$.

2. Відокремлюємо дійсну і уявну частини у вигляді:

$$G(j\omega) = R(\omega) + jQ(\omega) = G(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$$

де $G(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$ – вектор;

$G(\omega)$ – амплітуда;

$\varphi(\omega)$ – фаза.

3. Знаходимо залежність $R(\omega)=f(\omega)$ і $Q(\omega)=f(\omega)$ шляхом зміни значення частоти ω від 0 до $+\infty$.

4. За отриманими даними будуємо АФЧХ (годограф) Михайлова в площині осей $R(\omega)$ і $Q(\omega)$.

Для стійкої системи необхідно і достатньо, щоб при зміні кутової частоти ω від 0 до ∞ годограф, що описується кінцем вектору $G(j\omega)$, починався на дійсній додатній напівосі і, обертаючись тільки проти годинникової стрілки, ніде не обертаючись в нуль, проходив би, повернувшись на кут $\pi/2$, послідовно число квадрантів, що дорівнює степеню n характеристичного рівняння.

Якщо хоча б одна з вказаних умов не виконується, то система нестійка.

ПРИКЛАД 1

Визначити стійкість САК за частотним критерієм стійкості Михайлова, якщо характеристичне рівняння таке:

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

При цьому в характеристичному рівнянні (1) необхідно підставити замість s вираз $j\omega$, а після цього з урахуванням того, що $j^2 = -1$, $j^3 = -j$, $j^4 = 1$ отримаємо вираз (2, 3) у вигляді:

$$G = a_0(j\omega)^n + a_1(j\omega)^{n-1} + \dots + a_{n-1}j\omega + a_n = 0 \quad (2)$$

та в числовому вигляді:

$$G(j\omega) = 0,1(j\omega)^4 + (j\omega)^3 + 10(j\omega)^2 + 40(j\omega) + 100 \quad (3)$$

Потім, відокремлюємо дійсну і уявну частини, характеристичне рівняння представимо у вигляді комплексного поліному

$$G(j\omega) = R(\omega) + jQ(\omega) \quad (4)$$

$$R(\omega) = 0,1\omega^4 - 10\omega^2 + 100 \quad (5)$$

$$Q(\omega) = -\omega^3 + 40\omega \quad (6)$$

Згідно критерію Михайлова, для стійкої замкнутої системи n -го порядку необхідно і достатньо, щоб годограф Михайлова, що описується кінцем вектору $G(j\omega)$, при зміні частоти ω від 0 до $+\infty$, починаючи при $\omega = 0$ на дійсній додатній напівосі, описував би тільки проти годинникової стрілки послідовне число квадрантів координатної площини, рівне порядку " n " характеристичного рівняння (в нашому випадку 4).

Після чого, задаючись різними значеннями w від 0 до $+\infty$, знаходимо величини $R(w)$ і $Q(w)$ та побудуємо графік $R(w) = f Q(w)$ в площині комплексних змінних. Результати розрахунків зведемо до таблиці 1.

Таблиця 1 - Розрахункові дані для побудови годографа Михайлова

w	0	2	4	6	7	9	10
$R(w)$	100	61,6	-34,4	-130	-150	-54	100
$Q(w)$	0	72	96	24	-63	-269	-600

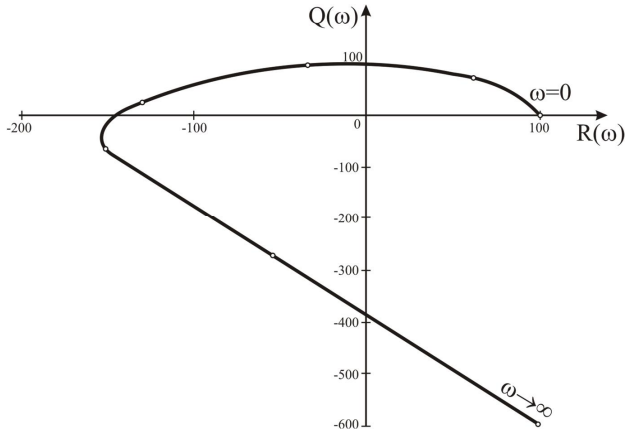


Рисунок 2 - Годограф Михайлова досліджуваної системи

Система автоматичного керування є стійкою тому, що годограф Михайлова послідовно проходить проти годинникової стрілки через чотири квадранти, охоплює крапку з координатами (0.0) та йде в нескінченність.

За цими ж даними побудуємо окремі залежності $R(w)$ та $Q(w)$ від w (рис. 3) для визначення запасу стійкості. Зближення коренів поліномів показує на те, що система автоматичного керування наближається до межі стійкості.

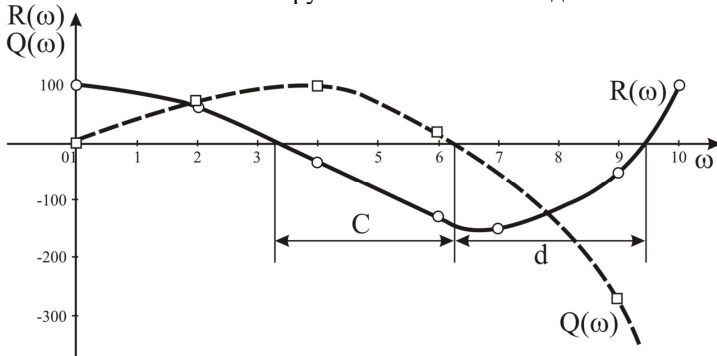


Рисунок 3 – Визначення запасу стійкості

Запас стійкості визначається за формулою:

$$z = \frac{C}{d} 100\% = \frac{3}{3,15} 100 = 95,2\% \quad (7)$$

Висновок: *Замкнута система САК є стійкою, тому що виконується вимога критерію Михайлова і запас стійкості дорівнює 95,2 %.*

2. Критерій Найквіста (1932 р.)

В 1932 р. американський вчений Г. Найквіст розробив критерій стійкості для дослідження електронних підсилювачів зі зворотним зв'язком. Пізніше цей критерій було поширено й на інші системи, які мають зворотний зв'язок.

Застосування цього критерію є доцільним, оскільки:

- оцінка стійкості замкнутої САК здійснюється на основі передаточних функцій відповідних розімкнутих систем;
 - він дозволяє застосовувати експериментальні частотні характеристики замість диференціальних рівнянь складних систем;
 - він пов'язує дослідження стійкості з наступним аналізом якості САК.
- Для визначення стійкості САК необхідно виконати такі кроки.

1. У рівнянні передаточної функції *розімкнутої* системи $W_{\text{РОЗ}}(s)$ підставляємо замість $s \textcircled{R} j\omega$, одержуючи вираз:

$$W_{\text{РОЗ}}(j\omega) = \frac{b_0(j\omega)^m + b_1(j\omega)^{m-1} + \dots + b_{m-1}j\omega + b_m}{a_0(j\omega)^n + a_1(j\omega)^{n-1} + \dots + a_{n-1}j\omega + a_n} \quad (8)$$

2. Шляхом відомих перетворень поділяють чисельник і знаменник на дійсну і уявну частини.

3. Поділити передаточну функцію на дві частини окремо дійсну і окремо уявну.

Перший шлях – необхідно чисельник і знаменник виразу (8) помножити на вираз сполучений знаменнику, при цьому після проведених алгебраїчних дій, поділити дійсну частину чисельника на отриманий знаменник і окремо поділити уявну частину чисельника на отриманий знаменник.

Другий шлях – відокремити в чисельнику і знаменнику (8) допоміжні коефіцієнти $a(\omega)$, $b(\omega)$ - дійсну і уявну частини чисельника; $c(\omega)$, $d(\omega)$ - те ж - для знаменника.

Для визначення дійсної $R(\omega)$ і уявної $Q(\omega)$ частин рівняння (8), скористаємося виразами (9) і (10):

$$R(\omega) = \frac{a(\omega) \cdot c(\omega) + b(\omega) \cdot d(\omega)}{c^2(\omega) + d^2(\omega)} \quad (9)$$

$$Q(\omega) = \frac{b(\omega) \cdot c(\omega) - a(\omega) \cdot d(\omega)}{c^2(\omega) + d^2(\omega)} \quad (10)$$

4. Задаючись різноманітними значеннями кутової частоти ω , знаходимо значення $R(\omega)$ і $Q(\omega)$ і будуємо у комплексній площині годограф Найквіста (рис. 4.).

Визначення стійкості за критерієм Найквіста.

1- й випадок: система автоматичного керування, стійка в розімкнутому стану, буде стійкою і в замкненому стану, якщо АФЧХ $W(j\omega)$ цієї системи в розімкнутому стані не охоплює точку з координатами $-1; j0$ (рис. 4).

2- й випадок: система автоматичного керування нестійка в розімкнутому стані, буде стійка в замкненому стані, якщо її АФЧХ $W(j\omega)$ в розімкнутому стані при зміні кутової частоти ω від 0 до $+\infty$ охоплює точку з координатами $-1; j0$ у додатному (проти годинникової стрілки) напрямку q разів (q кількість коренів з додатними дійсними частинами).

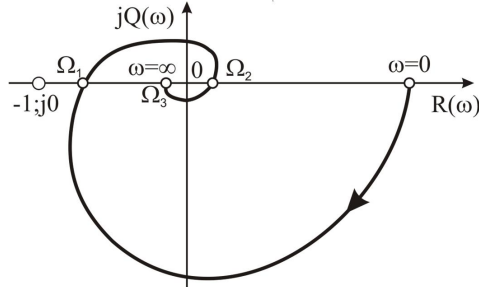


Рисунок 4 – Годограф Найквіста

ПРИКЛАД 2

Визначити стійкість САК за частотним критерієм стійкості Найквіста, якщо є характеристичне рівняння замкнутої системи:

$$W_{\text{ЗАМ}}(s) = \frac{s^4 + 3s^3 + 4s^2 + 11s + 9}{3s^3 + 2s^2 + 1,1s + 2}$$

Передаточна функція розімкненої САК знаходиться по виразу (11) і має вигляд:

$$W_{\text{РОЗ}}(s) = \frac{W_{\text{ЗАМ}}(s)}{1 - W_{\text{ЗАМ}}(s)} = \frac{s^4 + 3s^3 + 4s^2 + 11s + 9}{-s^4 - 2s^2 - 9,9s - 7} \quad (11)$$

Отже, виконуємо заміну $s \rightarrow j\omega$ та відокремлюємо дійсну та уявну частину передаточної функції розімкненої системи, використовуючи допоміжні вирази (9) і (10):

$$W_{\text{РОЗ}}(s) = \frac{(j\omega)^4 + 3(j\omega)^3 + 4(j\omega)^2 + 11(j\omega) + 9}{-(j\omega)^4 - 2(j\omega)^2 - 9,9(j\omega) - 7} \quad (12)$$

Враховуючи, що $j^3 = -j$, $j^2 = -1$ передаточна функція прийме вигляд

$$W(j\omega) = \frac{-\omega^8 + 6\omega^6 + 5,7\omega^4 - 62,9\omega^2 - 63}{\omega^8 - 10\omega^6 + 18\omega^4 + 53\omega^2 + 49} + j \frac{\omega^6 - 6\omega^4 + 26,9\omega^2 - 82,6}{\omega^8 + 10\omega^6 + 18\omega^4 + 53\omega^2 + 49}$$

Задаємося значенням ω [0; +∞), отримані дані зводимо у таблицю 2.

Таблиця 2- Результати розрахунків

ω	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1	5	10
R(ω)	0	-0,13	-0,23	-0,31	-0,35	-0,39	-0,41	-0,43	-0,39	0,82	0,94
Q(ω)	1,28	1,21	0,99	0,87	0,78	0,69	0,62	0,51	0,42	-0,41	-0,27

За отриманими чисельними даними побудуємо годограф Найквіста

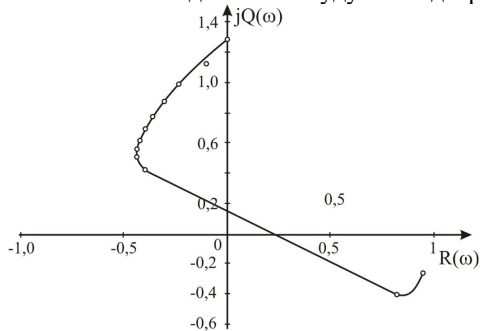


Рисунок 5 – Годограф Найквіста розімкненої САК

Висновок: *Оскільки годограф Найквіста для розімкненої системи не охоплює точку з координатами $(-1; j0)$ у від'ємному напрямку, то можна зробити висновок, що замкнена система стійка.*

3. Логарифмічний критерій

Про стійкість замкнутої системи автоматичного керування, судять по логарифмічних амплітудних (ЛАЧХ) і фазових (ЛФЧХ) частотних характеристиках розімкненої системи.

Критерій Найквіста дозволяє з'ясувати стійкість замкнутої системи не тільки по АФЧХ, але і по ЛФЧХ розімкненої системи. Цю можливість використовують досить широко через простоту побудови таких характеристик. Умова знаходження замкнутої системи на межі стійкості відповідно до критерію Найквіста виражається співвідношеннями:

$$\begin{cases} |W_p(j\omega_\pi)| = 1 \\ \varphi(\omega) = \text{Arg}W_p(j\omega_\pi) = -\pi \end{cases} \quad (13)$$

Звідки виходить наступний різновид формулювання цього критерію: якщо розімкнута система стійка, то для забезпечення її стійкості в замкнутому стані необхідно і достатньо, щоб при досягненні ФЧХ розімкненої системи значення $-L$, ЛАЧХ цієї ж системи була від'ємною.

ПРИКЛАД 3

Визначити стійкість САК за логарифмічним критерієм стійкості, якщо є характеристичне рівняння розімкненої системи:

$$W_p(s) = \frac{0,34s^3 + 2,76s^2 + 2s + 1}{3,13s^4 + 2,56s^3 - 2,13s^2 + 0,2s + 3,8}$$

Отже, виконуємо заміну $s \rightarrow j\omega$ та відокремлюємо дійсну і уявну частину передаточної функції розімкненої системи.

$$W_p(j\omega) = \frac{0,34(j\omega)^3 + 2,76(j\omega)^2 + 2j\omega + 1}{3,13(j\omega)^4 + 2,56(j\omega)^3 - 2,13(j\omega)^2 + 0,2j\omega + 3,8}$$

Враховуючи, що $j^4=1$, $j^3=-j$, $j^2=-1$ передаточна функція прийме вигляд:

$$W_p(j\omega) = \frac{1-2,76\omega^2+j(2\omega+0,34\omega^3)}{3,8-2,13\omega^2+3,13\omega^4+j(0,2\omega-2,5\omega^3)} \quad (14)$$

Потім, використовуючи допоміжні коефіцієнти (9) і (10) поділяємо передаточну функцію на дійсну $R(\omega)$ і уявну $Q(\omega)$ частини.

$$R(\omega) = \frac{-7,76\omega^6 + 3,826\omega^4 - 12,226\omega^2 + 3,8}{9,8\omega^8 - 6,86\omega^6 + 27,3\omega^4 - 15,76\omega^2 + 14,4}$$

$$Q(\omega) = \frac{-1,16\omega^7 - 0,16\omega^5 - 2,426\omega^3 + 7,4\omega}{9,8\omega^8 - 6,86\omega^6 + 27,3\omega^4 - 15,76\omega^2 + 14,4}$$

Після чого, задаючись значеннями ω від 0 до $+\infty$, знаходимо величини $L(\omega)$ і $j(\omega)$ та побудуємо графіки $20 \lg L(\omega) = f(\omega)$ і $j(\omega) = \varphi(\omega)$ в площині комплексних змінних, по яких визначимо характерні точки.

$$L(\omega) = \sqrt{R^2(\omega) + Q^2(\omega)}$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{Q(\omega)}{R(\omega)} + m\pi, \text{ де } m = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots$$

Задаємося значенням ω $[0; +\infty)$, отримані дані зводимо у таблицю 3.

Таблиця 3- Результати розрахунків

ω	0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
$R(\omega)$	0,263	0,257	0,239	0,152	-0,038	-0,292	-0,427	-0,319	-0,195	-0,127	-0,089	-0,065	-0,050
$I(\omega)$	0,000	0,052	0,105	0,222	0,319	0,287	0,132	-0,054	-0,058	-0,047	-0,039	-0,033	-0,028
$L(\omega)$	0,263	0,263	0,262	0,269	0,322	0,410	0,447	0,323	0,204	0,136	0,097	0,073	0,057
$20 \lg L(\omega)$	-11,596	-11,614	-11,646	-11,395	-9,854	-7,751	-7,002	-9,807	-13,823	-17,341	-20,275	-22,734	-24,825
$\varphi(\omega)$	0,000	0,198	0,415	0,972	-1,45	-0,77	-0,30	0,169	0,289	0,355	0,412	0,465	0,516

За отриманими даними будемо ЛАЧХ та ЛФЧХ системи, які представлені на рис. 6.

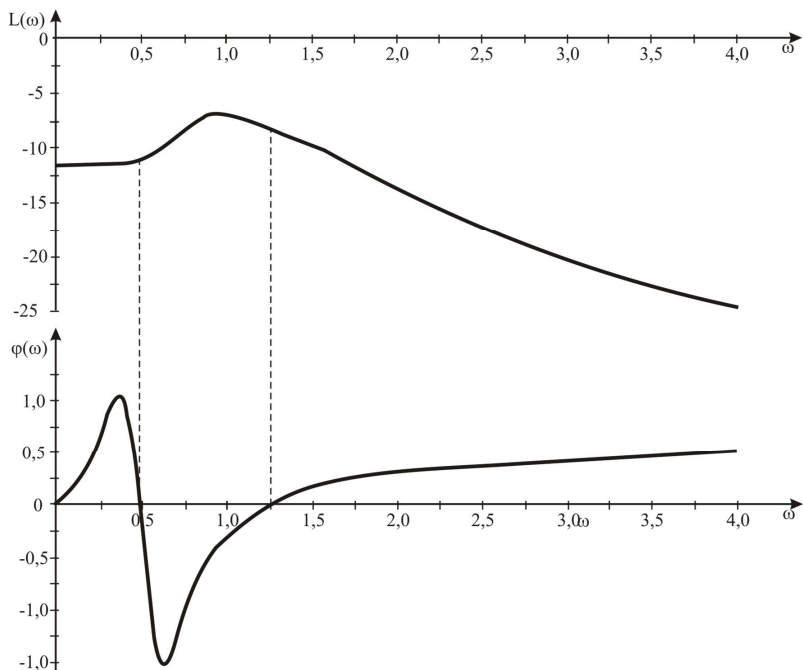


Рисунок 6 – Логарифмічні частотні характеристики

Висновок: система автоматичного керування в розімкненому стані, буде стійкою і в замкнутому стані, оскільки точка ЛАЧХ знаходиться у від'ємній області.

ЗАВДАННЯ ДО САМОСТІЙНОЇ ДОМАШНЬОЇ ПІДГОТОВКИ

1. Відновити теоретичний матеріал за темою "Стійкість САК".
2. З курсу математики відновити знання за темою " Принцип аргументу".

ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Вивчення основних теоретичних відомостей до практичного заняття.
2. Виконати завдання до практичної роботи.

ЗАВДАННЯ 1

За заданою передаточною функцією замкненої системи автоматичного керування визначити стійкість за частотним критерієм Михайлова.

$$W(s) = \frac{100}{5s^4 + 0,1s^3 + 2s^2 + 2s + 1}$$

ЗАВДАННЯ 2

За заданою передаточною функцією замкненої системи автоматичного керування визначити стійкість за частотним критерієм Найквіста.

$$W(s) = \frac{1}{2s^5 + s^4 + s^3 + 2,5s^2 + s + 1}$$

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке стійкість САК?
2. Чому стійкість стали визначати за критеріями стійкості?
3. Що таке критерій стійкості?
4. Які Вам відомі частотні критерії стійкості?
5. В чому полягає суть частотного критерію стійкості Михайлова?
6. В чому полягає суть частотного критерію стійкості Найквіста?
7. В чому полягає суть логарифмічного критерію стійкості?
8. Що таке характеристичне рівняння?
9. Що обирається в якості характеристичного рівняння для визначення стійкості за частотним критерієм Михайлова?
10. Що обирається в якості характеристичного рівняння для визначення стійкості за частотним критерієм Найквіста?
11. Чим відрізняється логарифмічний критерій стійкості від частотного критерію Найквіста?
12. Що таке запас стійкості і як він визначається за частотним критерієм Михайлова (Найквіста)?

ПРАКТИЧНА РОБОТА

ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПО ПЕРЕХІДНИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Мета заняття: засвоїти методику визначення показників якості регулювання систем автоматичного керування в перехідних процесах.

СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

До систем автоматичного керування висуваються вимоги не лише стійкості процесів керування. Для працездатності системи також потрібно, щоб процес автоматичного керування здійснювався при забезпеченні заданих показників якості.

Якщо досліджувана САК є стійкою, виникає питання, наскільки якісно проходить регулювання в цій системі і чи відповідає він технологічним вимогам до об'єкту керування.

Якість процесу керування визначається поведінкою САК при переході з одного режиму роботи в інший.

Для визначення показників якості системи проводять аналіз реакції системи на різного роду типові сигнали (одиничний стрибок, одиничний імпульс, гармонійний сигнал, стаціонарний випадковий процес).

Для забезпечення стійкої і високоякісної роботи автоматична система повинна забезпечити задану точність відповідно до вимог технологічного процесу як в усталеному, так і в динамічному режимах.

Точність роботи автоматичної системи визначається наявністю різниці між задаючою дією і вихідною величиною в різних усталених режимах.

Динамічну точність автоматичної системи при дії стаціонарного випадкового процесу оцінюють за допомогою середньоквадратичної похибки.

На практиці в основному якість регулювання визначається візуально за графіком перехідної характеристики.

Класифікація показників якості складається з декількох груп:

- прямі - визначаються безпосередньо на основі перехідної характеристики процесу;
- кореневі - визначаються за коренями характеристичного полінома;
- частотні - за частотними характеристиками;
- інтегральні - одержують шляхом інтегрування функцій.

Для оцінки якості роботи автоматичної системи керування в перехідних режимах скористаємося перехідними характеристиками, аналітичний розрахунок яких є завданням складним. Тому для отримання кривої перехідного процесу застосовується ряд наближених методів, одним з найбільш поширених є метод трапецій Солодовнікова. Побудову перехідного процесу з використанням цього методу засновано на заміні дійсної частотної

характеристики замкнутої автоматичної системи рядом трапецій, кожна з яких будується з дотриманням відповідних правил.

1. Для отримання дійсної частотної характеристики необхідно у виразі передаточної функції замкнутої системи зробити заміну $s \rightarrow j\omega$ і відокремити дійсну і уявну частини в чисельнику і знаменнику.

2. Використовуючи допоміжні коефіцієнти $a(\omega)$, $b(\omega)$ - дійсна і уявна частини чисельника; $c(\omega)$, $d(\omega)$ - те ж - для знаменника, визначити дійсну частину $R(\omega)$. Для визначення дійсної $R(\omega)$ частини рівняння, скористаємося виразами (1):

$$R(\omega) = \frac{a(\omega) \cdot c(\omega) + b(\omega) \cdot d(\omega)}{c^2(\omega) + d^2(\omega)} \quad (1)$$

3. Задаючись значенням кутової частоти ω від 0 до $+\infty$, визначимо для різних частот значення $R(\omega)$ і за отриманими значеннями побудуємо дійсну частотну характеристику $R(\omega) = f(\omega)$. Кількість розрахункових частотних точок повинна бути достатньою для детального зображення форми ДЧХ.

Примітка - максимальне значення частоти буде тоді, коли ДЧХ буде асимптотично наближатися до осі частоти ω .

4. Згідно методу трапецій В. В. Солодовнікова, отриману дійсну частотну характеристику розбиваємо на трапеції, з дотриманням таких правил:

- підстави мають бути паралельні осі частот ω ;
- однією з бічних сторін є відрізок осі $R(\omega)$, що відсікається підставами трапеції;
- другою бічною стороною є січна, що сполучає дві сусідні точки ДЧХ.

5. Кожна з трапецій характеризується параметрами:

- висотою $\pm R_i(0)$ (знак "+" береться, якщо нижня підстава більше ніж верхня $w_a > w_n$ і знак "-", якщо $w_a < w_n$ трапеція правильна);
- частотою зламу w_n ;
- частотою зрізу w_a ;
- коефіцієнтом нахилу C , $C = w_n/w_a$.

6. Для побудови перехідних характеристик використовується поняття одиничної трапеції, у якій висота $R_i(0) = 1$ і частота зламу $w_n = 1$. Отже, прямокутні одиничні трапеції відрізняються між собою тільки значеннями частоти зламу w_a або коефіцієнту нахилу. Для перевірки правильності апроксимації речової частотної характеристики необхідне виконання умови:

$$\sum_{i=1}^n R_i(0) = R(0) \quad (2)$$

де $R(0)$ - значення речової частотної характеристики $R(\omega)$ при $\omega = 0$.

Для одиничних трапецій з різним значенням складені спеціальні таблиці h - функцій. (Додаток Д)

Криві перехідного процесу будують в наступній послідовності:

1. Знаходять значення коефіцієнту нахилу C реальної трапеції;

- По таблиці h - функцій виписують значення перехідного процесу для одиначної трапеції з c , рівними реальній трапеції. Для цього, задаючись значеннями t_T знаходимо по таблиці значення \dot{h} для потрібного коефіцієнту c .
- Знаходимо значення ординат h для реальної трапеції з урахуванням її знаку, отримуючи ординату h_i , тобто:

$$h = \dot{h} \cdot R_i \quad (3)$$

- Розрахункові точки значень часу для побудови реального перехідного процесу знаходять через відношення значень t_T до частоти зрізу ω_a реальної трапеції, тобто:

$$t = \frac{t_T}{\omega_a} \quad (4)$$

Отримані дані зводяться до таблиці, наприклад за такою формою:

t	Трапеція 1			Трапеція (n-1)			Трапеція n		
	C ₁ =___			C _{n-1} =___			C _n =___		
	h ₁	t ₁	h ₁	h _{n-1}	t _{n-1}	h _{n-1}	h _n	t _n	h _n
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
26									

7. За даними таблиці будемо криві перехідних процесів для кожної трапеції, а для визначення загального перехідного процесу проводимо графічне складання ординат окремих перехідних процесів.

8. Визначення показників якості регулювання по перехідній характеристиці.

Для визначення показників якості регулювання САК необхідно проаналізувати розрахункову перехідну характеристику.

До показників якості регулювання САК відносять:

- Час регулювання $t_{рег}$ - цей показник дозволяє оцінити швидкостію САК. Повне згасання перехідного процесу в САК відбувається лише при $t \gg \tau$, тому умовно закінченням перехідного процесу прийнято вважати точку перетинання графіку перехідного процесу з лініями відхилення $\pm(2...5) \%$ від сталого значення $h_{ст}$. Це чисельне значення $\pm(2...5) \%$ $h_{ст}$ називають припустимою статичною помилкою (відхиленням) регульованої величини, позначається вона D , тоді $D = \pm(0,02...0,05) h_{ст}$, у теорії приймають $D = \pm 0,05 h_{ст}$. рис. 1.

- Статична похибка регулювання - дійсне відхилення регульованої величини від заданого значення по закінченню перехідного процесу. Вона завжди повинна бути менше D .

- Максимальне відхилення регульованої величини h_{MAX1} , (тобто перший максимум регульованої величини).

- Час досягнення першого максимуму t_{MAX} .

- Максимальне перерегулювання або максимум перерегулювання, у відсотках:

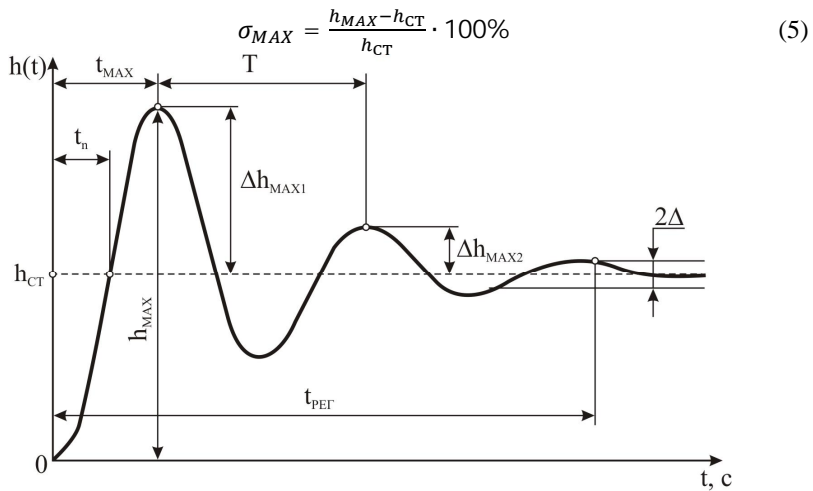


Рисунок 1 - Перехідна характеристика САК

6. Коливальність САК - число коливань пр регульованій величині протягом часу перехідного процесу $t_{PEГ}$.

7. Власна частота коливань САК:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} \quad (6)$$

8. Згасання перехідного процесу САУ h (іноді називане ступенем стійкості):

$$\eta = 1 - \exp\left\{-\frac{2\pi}{n_p}\right\} \quad (7)$$

Ця величина характеризує швидкість згасання перехідного процесу САК. Ця ж характеристика може бути визначена величиною, яка має назву логарифмічного декременту згасання:

$$d_c = \ln \frac{\Delta h_{MAX1}}{\Delta h_{MAX2}} \quad (8)$$

чим більше d_c , тим швидше згасає перехідний процес САК.

ПРИКЛАД

Визначити показники якості системи автоматичного керування, що описується передаточною функцією:

$$W_3(s) = \frac{4s^3 + 6s^2 + 2s + 1}{2,5s^4 + 3s^3 + 1,5s^2 + 6s + 3,2}$$

Для отримання дійсної частотної характеристики зробимо заміну s на $j\omega$ у виразі передаточної функції замкненої системи і представимо її у вигляді комплексного числа $W_3(j\omega) = R(\omega) + jQ(\omega)$.

Передаточна функція замкненої САК має вигляд:

$$W_3(j\omega) = \frac{4(j\omega)^3 + 6(j\omega)^2 + 2j\omega + 1}{2,5(j\omega)^4 + 3(j\omega)^3 + 1,5(j\omega)^2 + 6j\omega + 3,2}$$

На основі таблиць одиничних h -функцій (додаток Д) визначимо час перехідного процесу і за результатами розрахунків, що представлено у таблиці 3, будемо криві перехідних процесів для кожної трапеції.

Таблиця 3 – Розрахункові дані для побудови перехідної характеристики

t_{τ}	Трапеція 1			Трапеція 2			Трапеція 3		
	$c=0.3$	$R_1(0)=0.31$ $w_{\pi}=0.5 \text{ c}^{-1}$	h_1	$c=0.43$	$R_2(0)=-1.3$ $w_{\pi}=2.8 \text{ c}^{-1}$	h_2	$c=0.41$	$R_3(0)=1.3$ $w_{\pi}=1.2 \text{ c}^{-1}$	h_3
	\bar{h}_1	t_1	h_1	\bar{h}_2	t_2	h_2	\bar{h}_3	t_3	h_3
0	0	0	0.000	0	0.00	0.000	0	0.00	0.000
0.5	0.215	1	0.067	0.223	0.18	-0.290	0.223	0.42	0.290
1	0.417	2	0.129	0.432	0.36	-0.562	0.432	0.83	0.562
1.5	0.603	3	0.187	0.517	0.54	-0.672	0.517	1.25	0.672
2	0.761	4	0.236	0.786	0.71	-1.022	0.786	1.67	1.022
2.5	0.891	5	0.276	0.916	0.89	-1.191	0.916	2.08	1.191
3	0.987	6	0.306	1.013	1.07	-1.317	1.013	2.50	1.317
3.5	1.050	7	0.326	1.074	1.25	-1.396	1.074	2.92	1.396
4	1.090	8	0.338	1.107	1.43	-1.439	1.107	3.33	1.439
4.5	1.1	9	0.341	1.115	1.61	-1.450	1.115	3.75	1.450
5	1.103	10	0.342	1.112	1.79	-1.446	1.112	4.17	1.446
5.5	1.093	11	0.339	1.095	1.96	-1.424	1.095	4.58	1.424
6	1.070	12	0.332	1.068	2.14	-1.388	1.068	5.00	1.388
6.5	1.049	13	0.325	1.043	2.32	-1.356	1.043	5.42	1.356
7	1.033	14	0.320	1.023	2.50	-1.330	1.023	5.83	1.330
7.5	1.017	15	0.315	1.005	2.68	-1.307	1.005	6.25	1.307
8	1.012	16	0.314	0.995	2.86	-1.294	0.995	6.67	1.294
9	1.006	18	0.312	0.992	3.21	-1.290	0.992	7.50	1.290
10	1.006	20	0.312	0.993	3.57	-1.291	0.993	8.33	1.291
12	0.994	24	0.308	0.988	4.29	-1.284	0.988	10.00	1.284
14	0.983	28	0.305	0.985	5.00	-1.281	0.985	11.67	1.281
16	0.992	32	0.308	0.998	5.71	-1.297	0.998	13.33	1.297
18	1.001	36	0.310	1.008	6.43	-1.310	1.008	15.00	1.310
20	1.001	40	0.310	1.005	7.14	-1.307	1.005	16.67	1.307
22	1.005	44	0.312	1.004	7.86	-1.305	1.004	18.33	1.305
24	1.007	48	0.312	1.002	8.57	-1.303	1.002	20.00	1.303
26	1.002	52	0.311	0.997	9.29	-1.296	0.997	21.67	1.296

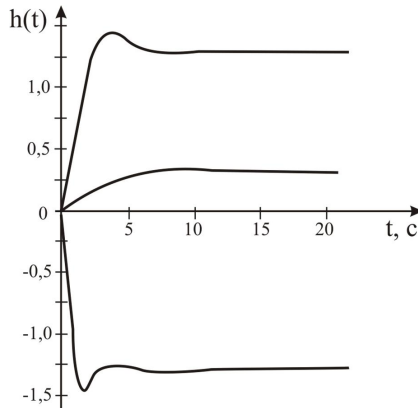


Рисунок 4 - Криві перехідних процесів для кожної з трапецій

Графік перехідної характеристики будемо методом графічного додавання отриманих перехідних характеристик кожної з трапецій. Результуюча крива представлена на рисунку 6.

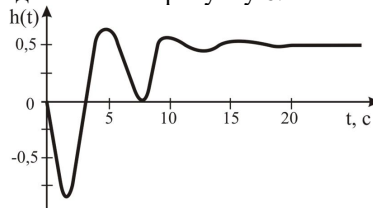


Рисунок 5 – Загальна крива перехідного процесу САК

Визначаємо показники якості регулювання:

1. Час регулювання $t_p=15\text{c}$;
2. Перерегулювання $\sigma_{MAX} = \frac{h_{MAX}-h_{уст}}{h_{уст}} \cdot 100\% = \frac{0,4-0,32}{0,32} \cdot 100\% = 25\%$;
3. Частота коливань $\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = \frac{2 \cdot 3,14}{4} 1,57 \text{ c}^{-1}$;
4. Число коливань $n=3$
5. Час досягнення першого максимуму $t_{MAX} = 3,5\text{c}$
6. Час наростання перехідного процесу $t_n=2,2\text{c}$
7. Декремент затухання $b = \frac{|h_{\max 1} - h_{уст}|}{|h_{\max 2} - h_{уст}|} = \frac{|0,4 - 0,32|}{|0,36 - 0,32|} = 2$

ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Вивчення основних теоретичних відомостей до практичного заняття.
2. Виконати завдання до практичної роботи.

ЗАВДАННЯ ДО САМОСТІЙНОЇ ДОМАШНЬОЇ ПІДГОТОВКИ

1. Ознайомитися з теоретичним матеріалом за даною темою [НП дисципліна ТОА].
2. Пройти тести за даною темою [НП дисципліна ТОА].
3. Відповісти на контрольні запитання.

ЗАВДАННЯ 1

Визначити показники якості системи автоматичного керування, якщо відома дійсна частотна характеристика рис. 6.

ЗАВДАННЯ 2

Визначити показники якості системи автоматичного керування, якщо відома дійсна частотна характеристика рис. 7.

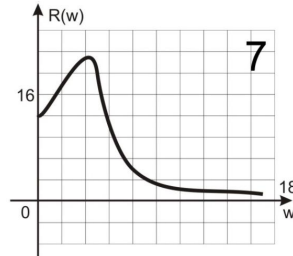
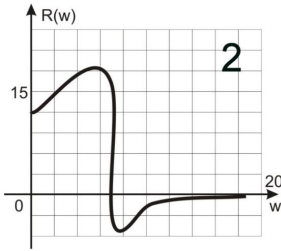


Рисунок 6 – ДЧХ САК до завдання 1 Рисунок 7 – ДЧХ САК до завдання 2

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Яким чином будується перехідна характеристика САК?
2. Поясніть сутність понять "точність" та "швидкодія" САК.
3. Як визначається та який фізичний зміст має поняття "перерегулювання"?
4. Як визначається та який фізичний зміст має поняття "декремент загасання"?
5. Як визначається та який фізичний зміст має поняття "час регулювання" та "час наростання перехідного процесу"?
6. За якими правилами розбивається речова характеристика САК на апроксимуючі трапеції?
7. Які існують оцінки якості САК в перехідних процесах?
8. Як визначається якість перехідного процесу САК за частотними оцінками?
9. Як визначається якість перехідного процесу САК за кореневими оцінками?
10. Як визначається якість перехідного процесу САК за інтегральними оцінками?
11. Які існують методи покращення якості перехідних процесів САК?
12. Що таке одична трапеція?
13. В чому полягає метод трапецій Солодовнікова?

ПРАКТИЧНА РОБОТА

ВИЗНАЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Мета заняття: засвоїти методику визначення показників надійності систем автоматичного керування

СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1. Основні поняття

Надійність - властивість об'єкта виконувати задані функції, зберігаючи в часі і в заданих межах значення встановлених експлуатаційних показників.

Об'єкт - технічний виріб певного цільового призначення, що розглядається в періоди проектування, виробництва, випробувань і експлуатації. Об'єктами можуть бути різні системи та їх елементи.

Елемент - найпростіша складова частина виробу, в задачах надійності може складатися з багатьох деталей.

Система - сукупність спільно діючих елементів, призначена для самостійного виконання заданих функцій.

Поняття елемента і системи трансформуються в залежності від поставленої задачі. Наприклад, магнітний пускач, при встановленні його власної надійності розглядається як система, що складається з окремих елементів - механізмів, деталей тощо, а при вивченні надійності принципової схеми - як елемент.

Надійність об'єкта характеризується наступними основними станами і подіями.

Справність - стан об'єкта, при якому він відповідає всім вимогам, встановленим нормативно-технічною документацією (НТД).

Працездатність - стан об'єкта, при якому він здатний виконувати задані функції, зберігаючи значення основних параметрів, встановлених НТД.

Основні параметри характеризують функціонування об'єкта при виконанні поставлених завдань.

Поняття справність ширше, ніж поняття працездатність. Працездатний об'єкт зобов'язаний задовольняти лише тим вимогам НТД, виконання яких забезпечує нормальне застосування об'єкта за призначенням. Таким чином, якщо об'єкт непрацездатний, то це свідчить про його несправність. З іншого боку, якщо об'єкт несправний, то це не означає, що він непрацездатний.

Граничний стан - стан об'єкта, при якому його застосування за призначенням недопустиме чи недоцільне.

Застосування (використання) об'єкта за призначенням припиняється в наступних випадках:

- при неусувному порушенні безпеки;
- при неусувному відхиленні величин заданих параметрів;

- при неприпустимому збільшенні експлуатаційних витрат.

Для деяких об'єктів граничний стан є останнім у його функціонуванні, тобто об'єкт знімається з експлуатації, для інших - певною фазою в експлуатаційному графіку, що вимагає проведення ремонтно-відновлювальних робіт.

У зв'язку з цим, об'єкти можуть бути:

- не відновлювані, для яких працездатність у випадку виникнення відмови, не підлягає відновленню;
- відновлювані, працездатність яких може бути відновлена, в тому числі і шляхом заміни.

До невідновлюваних об'єктів можна віднести, наприклад: підшипники ковзання, напівпровідникові вироби, зубчасті колеса і т. п. Об'єкти, що складаються з багатьох елементів, наприклад, магнітний пускач, електродвигун, електронна апаратура, є відновлюваними, оскільки їх відмови пов'язані з ушкодженнями одного або небагатьох елементів, які можуть бути замінені.

У ряді випадків один і той же об'єкт в залежності від особливостей, етапів експлуатації або призначення може вважатися відновлюваним чи невідновлюваним.

Відмова - подія, що полягає в порушенні працездатного стану об'єкта. Критерій відмови - відмінна ознака або сукупність ознак, за якими встановлюється факт виникнення відмови.

2. Класифікація та характеристики відмов

За типом відмови поділяються на:

- відмови функціонування (виконання основних функцій об'єктом припиняється, наприклад, обрив р-п переходу діода);
- відмови параметричні (деякі параметри об'єкта змінюються в неприпустимих межах, наприклад, зміна струму ділянки через зміщення робочої точки напівпровідникового транзистору).

За своєю природою відмови можуть бути:

- випадкові, зумовлені непередбачуваними перевантаженнями, дефектами матеріалу, помилками персоналу або перебоями системи керування тощо;
- систематичні, обумовлені закономірними і неминучими явищами, що викликають поступове накопичення пошкоджень: втома, знос, старіння, корозія та інше.

Основні ознаки класифікації відмов:

- характер виникнення;
- причина виникнення;
- характер усунення;
- наслідки відмов;
- подальше використання об'єкта;

- легкість виявлення;
- час виникнення.

Розглянемо докладніше кожен з класифікаційних ознак:

Характер виникнення:

- раптова відмова - відмова, що проявляється в різкій (миттєвій) зміні характеристик об'єкта. Ці відмови зазвичай виявляються у вигляді механічних пошкоджень елементів (тріщини - крихке руйнування, пробої ізоляції, обриви тощо) і не супроводжуються попередніми видимими ознаками їх наближення, і вони характеризується незалежністю моменту настання від часу попередньої роботи;
- поступова відмова - відмова, що відбувається в результаті повільного поступового погіршення якості об'єкта і пов'язана із зносом деталей і старінням матеріалів.

Причина виникнення:

- конструкційна відмова, викликана недоліками і невдалою конструкцією об'єкта;
- виробнича відмова, пов'язана з помилками при виготовленні об'єкта з причини недосконалості або порушення технології;
- експлуатаційна відмова, викликана порушенням правил експлуатації.

Характер усунення:

- стійка відмова;
- переміжна відмова (виникаюча/зникаюча), наслідки відмови: легка відмова (легко відновлювані);
- середня відмова (не викликає відмови суміжних вузлів – вторинні відмови);
- важка відмова (викликає вторинні відмови або призводить до загрози життю і здоров'ю людини).

Подальше усунення об'єкта:

- повні відмови, що виключають можливість роботи об'єкта до його використання;
- часткові відмови, при яких об'єкт може частково використовуватися.

Легкість виявлення:

- очевидні (явні) відмови;
- приховані (неявні) відмови.

Час виникнення:

- приробітні відмови, що виникають у початковий період експлуатації;
- відмови при нормальній експлуатації;
- зносні відмови, викликані незворотними процесами зносу деталей, старіння матеріалів та ін.

3. Складові надійності

Надійність є комплексною властивістю, що включає в залежності від призначення об'єкта та умов його експлуатації ряд простих властивостей:

- **безвідмовність** - властивість об'єкта безупинно зберігати працездатність протягом деякого напрацювання або протягом деякого часу;
- **напрацювання** - тривалість або обсяг роботи об'єкта, яка вимірюється в будь-яких не спадаючих величинах (одиниця часу, число циклів навантаження, кілометри пробігу тощо);
- **довговічність** - властивість об'єкта зберігати працездатність до настання граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування і ремонтів;
- **ремонтпридатність** - властивість об'єкта, що полягає в його пристосованості до попередження і виявлення причин виникнення відмов, підтримці і відновленні працездатності шляхом проведення ремонтів і технічного обслуговування;
- **збереженість** - властивість об'єкта безупинно зберігати необхідні експлуатаційні показники протягом (і після) строку зберігання і транспортування.

Залежно від об'єкта надійність може визначатися усіма перерахованими властивостями або частиною їх. Наприклад, надійність колеса зубчастої передачі, підшипників визначається їх довговічністю, а верстата - довговічністю, безвідмовністю і ремонтпридатністю.

4. Основні показники надійності

Показник надійності кількісно характеризує, якою мірою даному об'єкту притаманні певні властивості, що зумовлюють надійність. Одні показники надійності (наприклад, технічний ресурс, термін служби) можуть мати розмірність, ряд інших (наприклад, ймовірність безвідмовної роботи, коефіцієнт готовності) є безрозмірними.

Розглянемо показники складової надійності - довговічність.

Технічний ресурс - напрацювання об'єкта від початку його експлуатації чи поновлення експлуатації після ремонту до настання граничного стану. Строго кажучи, технічний ресурс може бути регламентований наступним чином: до середнього, капітального, від капітального до найближчого середнього ремонту та інші. Якщо регламентація відсутня, то мається на увазі ресурс від початку експлуатації до досягнення граничного стану після всіх видів ремонтів.

Для не відновлюваних об'єктів поняття технічного ресурсу та напрацювання до відмови збігаються.

Призначений ресурс - сумарний наробіток об'єкта, при досягненні якого експлуатація повинна бути припинена незалежно від його стану.

Термін служби - календарна тривалість експлуатації (в тому числі, зберігання, ремонт та інше) від її початку до настання граничного стану.

На рисунку 1 наведена графічна інтерпретація перерахованих показників, при цьому:

$t_0 = 0$ - початок експлуатації;

t_1, t_5 - моменти відключення з технологічних причин;

t_2, t_4, t_6, t_8 , - моменти включення об'єкта;

t_3, t_7 - моменти виведення об'єкта в ремонт, відповідно, середній і капітальний;

t_9 - момент припинення експлуатації;

t_{10} - момент відмови об'єкта.

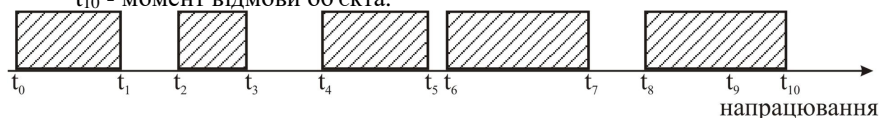


Рисунок 1 - Графічна інтерпретація показників довговічності

Технічний ресурс (напрацювання до відмови)

$$TR = t_1 + (t_3 - t_2) + (t_5 - t_4) + (t_7 - t_6) + (t_{10} - t_8).$$

Призначений ресурс

$$TH = t_1 + (t_3 - t_2) + (t_5 - t_4) + (t_7 - t_6) + (t_9 - t_8).$$

Термін служби об'єкта

$$TC = t_{10}.$$

Для більшості об'єктів електротехніки в якості критерію довговічності найчастіше використовується технічний ресурс.

2. Розрахунок показників надійності систем автоматичного керування

До основних показників надійності систем автоматики відносять час напрацювання на відмову і ймовірність безвідмовної роботи. Вихідною кількісною оцінкою для розрахунку надійності автоматичних пристроїв є інтенсивність відмов окремих елементів, обумовлена по спеціальних таблицях, складеним на підставі статистичних даних експлуатації електроустаткування. Ймовірність відмов САК визначається таким чином:

$$\lambda_{\Sigma} = k \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (1)$$

де λ_i - значення інтенсивності відмов i -го елемента, обумовлена по таблиці; k - поправочний коефіцієнт, що враховує вплив навколишнього середовища (для стаціонарних установок $k = 10 \dots 15$).

Час напрацювання на відмовлення ($T_{НАПР}$) є величиною, оберненою значенню ймовірності відмов САК:

$$T_{НАПР} = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}}. \quad (2)$$

Ймовірність безвідмовної роботи підпорядковується експонентному закону і визначається для окремого елемента за виразом:

$$P_i(t) = e^{-\lambda_i t_x}, \quad (3)$$

для всієї системи

$$P_{\Sigma}(t) = e^{-\lambda_{\Sigma}t_x}, \quad (4)$$

де t_x - час роботи, для якого визначаються параметри надійності (звичайно приймають $t_x = 1000$ годин з умови $t \in T_{\text{НАПР}}$).

ПРИКЛАД 1

Для принципової електричної схеми (рис. 2) визначити показники надійності.

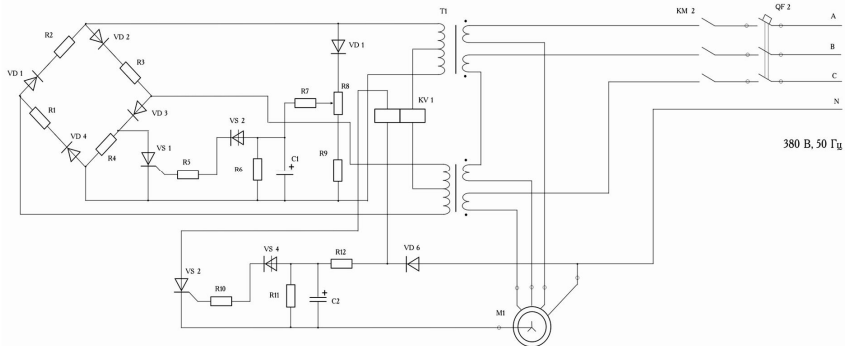


Рисунок 2 – Принципова електрична схема пристрою захисту електродвигуна

Для кожного елемента інші показники розраховуються аналогічно і зводяться в табл. 1

Таблиця 1 – Розрахунок показників надійності елементів і систем автоматизованого об'єкта.

Найменування елементів	Кількість	Інтенсивність відмови одного елемента, 10^{-6} год $^{-1}$	Сумарна інтенсивність відмови, 10^{-6} год $^{-1}$
Автоматичний вимикач	1	0,949	0,949
Діоди, стабілітрони	6	0,2	1,2
Змінний резистор	1	0,03	0,03
Конденсатори	2	0,1	0,2
Магнітний пускач	1	0,3	0,3
Проміжне реле	1	0,5	0,5
Резистори	12	0,053	0,636
Тиристор, диністори	4	0,5	2,0
Трансформатор	1	0,5	0,5
Електродвигуни	1	5,24	5,24
<i>Всього</i>			

$$\lambda_{\Sigma} = 10 \cdot 11,555 \cdot 10^{-6} = 11,555 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$$

$$T_{\text{НАП}} = \frac{1}{11,555 \cdot 10^{-5}} = 8654,3 \text{ год}$$

Приймаємо $T_{\text{НАП}} = 8000 \text{ год}$

$$P_i(t) = e^{-11,216 \cdot 10^{-5} \cdot 8000} = 0,41$$

ПРИКЛАД 2

Розрахувати функціональну і ефективну надійність системи керування гідроприводом, що складається з керуючого пристрою (А), датчика тиску (В) і насоса з електроприводом (С) (рис. 3).

Вихідні данні: час роботи системи $t = 1000 \text{ год}$; коефіцієнт готовності допоміжних пристроїв $k_B = 0,95$; $k_C = 0,85$; вагові коефіцієнти: $E_1 = 0,2$ - прийом інформації в пристрої В; $E_2 = 0,2$ - передача інформації з пристрою В в пристрій А; $E_3 = 0,3$ - обробка інформації в пристрої А; $E_4 = 0,2$ - видача інформації з пристрою А в пристрій С; $E_5 = 0,1$ - вивід інформації з пристрою С. Ймовірність відмов основного пристрою А - $\lambda_A = 0,07 \cdot 10^{-6}$.

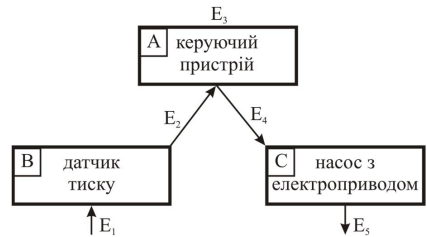


Рисунок 3 - Блок-схема системи керування

Для розрахунку функціональної надійності системи керування гідроприводом при максимальній ймовірності відмов пристроїв скористаємося табл. 2, з якої виберемо значення ймовірності відмов для датчика тиску ($\lambda_B = 6,6 \cdot 10^{-6}$) і насоса з електроприводом ($\lambda_C = 27,4 \cdot 10^{-6}$).

Визначаємо вірогідність безвідмовної роботи елементів:

$$P_A = e^{-\lambda_A \cdot t} = e^{-0,07 \cdot 10^{-6} \cdot 1000} = 0,999;$$

$$P_B = e^{-\lambda_B \cdot t} = e^{-6,6 \cdot 10^{-6} \cdot 1000} = 0,993;$$

$$P_C = e^{-\lambda_C \cdot t} = e^{-27,4 \cdot 10^{-6} \cdot 1000} = 0,979;$$

Таблиця 2 – Ймовірність відмов технічних елементів системи

№	Найменування пристрою	Ймовірність відмов $\lambda \times 10^6 \text{ годин}^{-1}$		
		максимальна (max)	середня (med)	мінімальна (min)
1	Датчик рівня рідини	3,73	2,6	1,47
	Датчик тиску	6,6	3,5	1,7
	Датчик температури	6,4	3,3	1,5
2	Насос з електроприводом	27,4	13,5	2,9
	Насос з механічним приводом	31,5	13,5	3,33

№	Найменування пристрою	Ймовірність відмов $I_A \times 10^6 \text{ годин}^{-1}$		
		максимальна (max)	середня (med)	мінімальна (min)
	Насос з гідроприводом	45,0	14,0	6,4
3	Регулятор витрат рідини	5,54	2,14	0,7
	Регулятор тиску	5,26	2,03	0,65
4	Перемикач плунжерний	0,112	0,054	0,041
	Перемикач кулачковий	0,12	0,075	0,048
5	Котушка індуктивності	0,031	0,02	0,011
	Котушка соленоїдна	0,091	0,04	0,02
6	Реле електромагнітне	0,50	0,11	0,03
7	Термореле	1,0	0,4	0,12
8	Муфта електромагнітна	0,93	0,6	0,45
9	Електродвигун	0,58	0,3	0,11

Визначаємо функціональну надійність системи по залежності:

$$P_{\Phi} = P_A \cdot (k_B \cdot P_B) \cdot (k_C \cdot P_C) = 0,999 \cdot (0,95 \cdot 0,993) \cdot (0,85 \cdot 0,972) = 0,778$$

Для визначення ефективної надійності системи керування гідроприводом розглянемо всі варіанти роботи системи, для чого складаємо таблицю станів системи (табл. 3).

Таблиця 3 – Можливі стани системи керування гідроприводом

Стан системи	Розрахункові формули	
	P_j	E_j
ABC	$P_A \times P_B \times P_C = 0,964$	1
$AB\bar{C}$	$P_A \times P_B \times (1 - P_C) = 2,7 \times 10^{-2}$	$E_1 + E_2 + E_3 + E_4 = 0,9$
$A\bar{B}C$	$P_A \times (1 - P_B) \times P_C = 6 \times 10^{-3}$	$E_1 + E_3 + E_4 + E_5 = 0,8$
$\bar{A}BC$	$(1 - P_A) \times P_B \times P_C = 9,6 \times 10^{-4}$	$E_1 + E_2 + E_5 = 0,5$
$A\bar{B}\bar{C}$	$P_A \times (1 - P_B) \times (1 - P_C) = 1,9 \times 10^{-4}$	$E_3 + E_4 = 0,5$
$\bar{A}B\bar{C}$	$(1 - P_A) \times P_B \times (1 - P_C) = 2,7 \times 10^{-5}$	$E_1 + E_2 = 0,4$
$\bar{A}\bar{B}C$	$(1 - P_A) \times (1 - P_B) \times P_C = 6,8 \times 10^{-6}$	$E_5 = 0,1$
$\bar{A}\bar{B}\bar{C}$	$(1 - P_A) \times (1 - P_B) \times (1 - P_C) = 2,7 \times 10^{-2}$	0

Примітка: X – пристрій справний; \bar{X} – пристрій не справний

$$P_{\exists} = \sum_{j=1}^n P_j(t) \cdot E_j = 0,964 \cdot 1 + 2,7 \cdot 10^{-2} \cdot 0,9 + 6,0 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 + 9,6 \cdot 10^{-4} \cdot 0,5 + 1,9 \cdot 10^{-4} \cdot 0,5 + 2,7 \cdot 10^{-5} \cdot 0,4 + 6,8 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1 + 1,0 \cdot 10^{-7} \cdot 0 = 0,994$$

ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Вивчення основних теоретичних відомостей до практичного заняття.
2. Виконати завдання до практичної роботи.

ЗАВДАННЯ ДО САМОСТІЙНОЇ ДОМАШНЬОЇ ПІДГОТОВКИ

1. Ознайомитися з теоретичним матеріалом за даною темою [НІП дисципліна ТОА].
2. Пройти тести за даною темою [НІП дисципліна ТОА].
3. Відповісти на контрольні запитання.

ЗАВДАННЯ 1

Задача 1. Визначити показники надійності (час напрацювання на відмову $T_{\text{НАР}}$ і вірогідність безвідмовної роботи P) заданої принципової електричної схеми автоматизованої системи керування користуючись [6] (стор. 252, рис. 11.19 - принципова електрична схема керування припливною вентиляцією).

Задача 2. Розрахувати функціональну і ефективну надійність заданої за варіантом системи керування (рис. 4.). Скласти таблицю можливих станів системи керування. Коефіцієнти готовності допоміжних пристроїв: $K_B = 0,8$; $K_C = 0,85$; $K_D = 0,9$; $K_E = 0,95$. Ймовірність відмов основного пристрою $I_A = 0,05 \times 10^6$ годин⁻¹. Час роботи системи $t = 1000$ годин. Розрахунковий стан системи - \overline{ABCDE} , ймовірність відмов для пристроїв B - min; C - med; D - max ; E - med. Ймовірність відмов технічних елементів системи наведено в таблиці 2.

ЗАВДАННЯ 2

Задача 1. Визначити показники надійності (час напрацювання на відмову $T_{\text{НАР}}$ і вірогідність безвідмовної роботи P) заданої принципової електричної схеми автоматизованої системи керування [6] (стор. 198, рис. 9.6 - принципова електрична схема тригеру керування і каскаду затримки системи "Середовище-1").

Задача 2. Розрахувати функціональну і ефективну надійність заданої за варіантом системи керування (рис. 5). Скласти таблицю можливих станів системи керування.

Коефіцієнти готовності допоміжних пристроїв: $K_B = 0,8$; $K_C = 0,85$; $K_D = 0,9$; $K_E = 0,95$. Ймовірність відмов основного пристрою $I_A = 0,05 \times 10^6$ годин⁻¹. Час роботи системи $t = 1000$ годин. Розрахунковий стан системи - \overline{ABCDE} , ймовірність відмов для пристроїв B - med; C - max; D - med ; E - med. Ймовірність відмов технічних елементів системи наведено в таблиці 2.

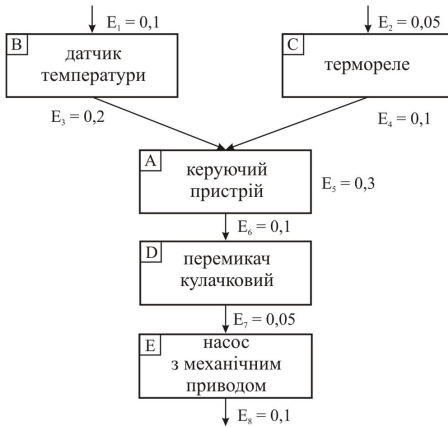


Рисунок 4 - Блок-схема системи керування

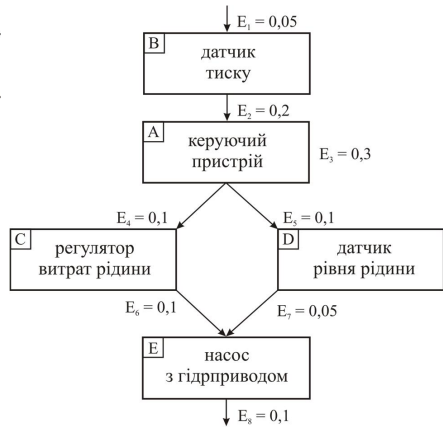


Рисунок 5 - Блок-схема системи керування

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. У чому полягає поняття надійності як властивості об'єкта?
2. Перелічіть і дайте визначення основних станів і подій, якими характеризується надійність?
3. У чому полягає спільність і відмінність станів "справність" і "працездатність" об'єкта?
4. За яких умов настає граничний стан об'єкта?
5. Якими можуть бути об'єкти по здатності до відновлення працездатного стану?
6. Якими можуть бути відмови за типом і природою походження?
7. Перелічіть основні ознаки класифікації відмов?
8. Перелічіть та дайте визначення властивостей (складових) надійності?
9. Дайте визначення показника надійності?
10. Перелічіть і поясніть показники довговічності?
11. Що таке ймовірність відмов елементів системи керування?
12. Як можна розрахувати ймовірність відмов елементів системи керування?
13. Як визначити час напрацювання на відмову?
14. Як визначити вірогідність безвідмовної роботи системи керування?
15. В яких числових межах знаходиться вірогідність безвідмовної роботи системи керування?
16. Як визначити функціональну і ефективну надійність системи керування?

ПРАКТИЧНА РОБОТА

СИНТЕЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ. ПОКРАЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ

Мета роботи: засвоїти методику синтезу систем автоматичного керування з метою поліпшення якісних показників, шляхом послідовної (паралельної) корекції

СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Синтез САК є основною стадією проектування. Сутність синтезу - це вибір такої структурної схеми системи і її параметрів і такого конструктивного рішення, при яких забезпечуються необхідні показники якості і точності регулювання процесів, а сама система складається з найбільш простих пристроїв регулювання.

В САК зазвичай входять об'єкт регулювання і два типи пристроїв керування. До першого типу відносять підсилювальний пристрій, підсилювач потужності і вимірювальний пристрій, які практично неможливо змінювати в процесі синтезу САК. До другого типу пристроїв відносять коригуючий пристрій та електронний підсилювач, тобто ті пристрої, які легко можна змінювати в процесі синтезу. В результаті САК можна розділити на дві частини: не змінювана і змінна частини.

На практиці синтез САК проходить таким шляхом:

- на основі технічних умов та динамічних характеристик об'єкту регулювання обирають пристрій керування, вимірювальні пристрої, що входять в незмінну частину системи;
- встановлюють спрощену схему системи та обирають схему і місце включення коригувальних та підсилювальних пристроїв;
- за критерієм якості або за вимогами на показники якості і точності регулювання знаходять бажану ЛЧХ розімкненої системи. Бажана ЛАЧХ має бути побудована таким чином, щоб коригувальні пристрої мали найбільш просту реалізацію;
- визначають тип і параметри коригувальних та підсилювальних пристроїв системи методом синтезу;
- знаходять конструктивне рішення коригувальних пристроїв і встановлюють остаточну структурну схему системи автоматичного регулювання;
- визначають розрахунковим шляхом динамічні характеристики САК і порівнюють їх з відповідними даними технічних умов.

1. Коригувальні ланки

Коригувальні ланки (КЛ) бувають двох типів (за методом включення):

1. Послідовні КЛ,
2. Паралельні КЛ.

Іноді застосовують два типи КЛ в одній САК.

КЛ паралельної дії також бувають двох видів: відповідно - паралельного і зустрічно-паралельного включення.

КЛ послідовної дії є найбільш простими і застосовуються в таких системах керування, в яких практично відсутні сигнали шумів або перешкод. Системи з послідовною корекцією мають більшу частоту зрізу, що пред'являє високі вимоги до динамічних характеристик двигунів виконавчих пристроїв. Послідовні коригуючі пристрої досить чутливі до змін їх параметрів, що вимагає застосування високостабільних конденсаторів і резисторів. Слід також зазначити, що при виході з ладу конденсаторів або резисторів послідовного коригуючого пристрою, як правило, вся система керування стає неприцездатною.

Паралельні коригуючі пристрої знижують частоту зрізу системи і роблять її малочутливою до перешкод і шумів. Істотною перевагою паралельної корекції є те, що вона зменшує вплив нестабільності та нелінійності характеристик пристрою керування, що стоїть в прямій гілці, на характер перехідних процесів всієї системи.

Коригуючі пристрої поділяються також на пасивні і активні. Активні коригуючі пристрої виконуються на базі операційних підсилювачів, де в якості вхідного опору і опору зворотного зв'язку використовуються RC кола. Активні послідовні КЛ найчастіше називають ще регуляторами.

Паралельні коригуючі пристрої утворюють так звані місцеві зворотні зв'язки. Однією з основних умов використання паралельної корекції є можливість фізичної реалізації, тобто необхідно мати вимірювальні пристрої вхідної координати, зворотні зв'язки та вимірювальні перетворювачі, які перетворюють дану координату у напругу або струм.

2. Побудова бажаної ЛАЧХ системи керування

Бажана ЛАЧХ визначається вимогами до показників якості динамічного режиму і точності процесів регулювання.

Низькочастотна частина цієї характеристики обумовлює точність відтворення повільно змінних впливів. За її видом можна знайти добротності за швидкістю і прискоренню та статичну помилку системи. Поведінка бажаної ЛАЧХ в області низької частоти визначається вимогами до точності відтворення впливів.

Нехай задана помилка відтворення впливів ϵ . Тоді:

$$\epsilon = \frac{1}{1 + k_p}, \quad k_p = \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} \approx \frac{1}{\epsilon}$$

Таким чином, можна розглянути два випадки:

1) якщо САК є статичною, і задана помилка відтворення ϵ , то в області низьких частот розімкнута ЛЧХ повинна мати нульовий уклін і проходити не нижче рівня $20 \lg(1/\epsilon)$.

Нехай $\epsilon = 5\%$, тоді

$$L_{\text{РНЧ}} = 20 \lg(1/\epsilon) = 26 \text{ дБ.}$$

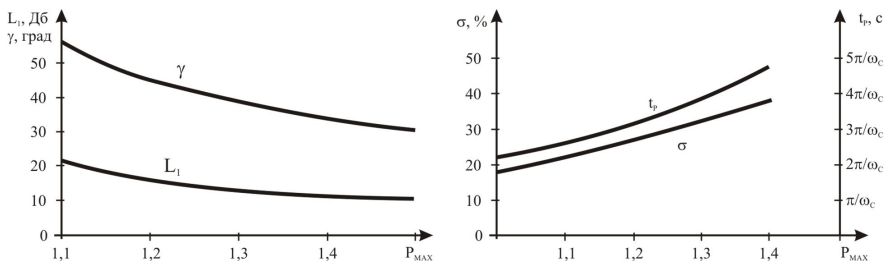
2) якщо система є астатичною, то розімкнута ЛАЧХ в області низьких частот будується наступним чином: якщо задані добротності системи за швидкістю і прискоренню, то визначаються наступні точки: $w_k = Dw$ і $w_i = \sqrt{D}\epsilon$. З першої точки проводимо пряму з нахилом -20 дБ/дек, з другої -40 дБ/дек.

За областю низьких частот починається область середніх частот. Права межа області середніх частот визначається по точці перетину бажаної характеристики з рівнем -16 дБ.

Область середніх частот повністю визначає показники якості перехідного процесу САК: в цій області знаходиться частота зрізу і запаси стійкості по фазі і по амплітуді. Головною умовою для ЛАЧХ в цій області є те, що характеристика повинна проходити точку зрізу з нахилом -20 дБ/дек і тривалість цієї ділянки повинна бути якомога більше. Діапазон частот, при якому повинен бути нахил -20 дБ / дек визначається з графіку на рис. 1 в залежності від заданого перерегулювання S_m .

Частота зрізу визначається за графіками на рисунку 1, б наступним чином: за значенням перерегулювання визначається максимум РЧХ P_m , потім по відомій P_m визначається залежність між t_p і w_c і сама частота зрізу САК по заданому часу регулювання t_p .

В області високих частот бажана ЛЧХ повинна бути паралельна некоригованій ЛАЧХ для того, щоб ЛАЧХ мала найбільш просту реалізацію.



а - Криві для визначення запасу по амплітуді L_1 і по запасу по фазі γ

б - Криві для визначення залежності перерегулювання S і часу регулювання t_p від максимального значення речової характеристики

Рисунок 1 – Графіки для побудови бажаної ЛАЧХ

Приклад побудови бажаної ЛАЧХ показано на рисунку 2.

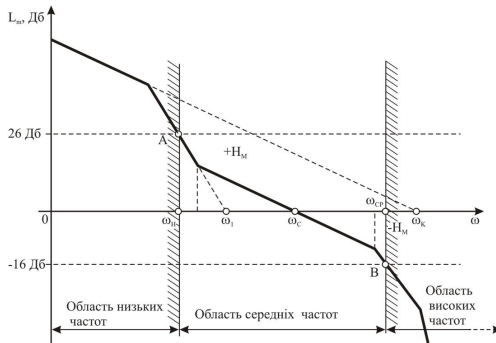


Рисунок 2 - Приклад побудови бажаної ЛАЧХ

3. Синтез послідовного коригування

При послідовній корекції передаточна функція розімкнутої САК має вид:

$$W_p(s) = W_{HC}(s) \cdot W_K(s) = W_B(s), \quad (1)$$

де $W_p(s)$ – передаточна функція розімкнутої САК;
 $W_{HC}(s)$ – передаточна функція нескоригованої САК;
 $W_K(s)$ – передаточна функція корегувальної ланки;
 $W_B(s)$ – бажана передаточна функція, що забезпечує задані параметри САК.

Перейшовши до логарифмічних характеристик, рівняння (1) прийме вид:

$$L_p(\omega) = L_{ж}(\omega) = L_{HC}(\omega) + L_K(\omega), \quad (2)$$

$$j_p(\omega) = j_{ж}(\omega) = j_{HC}(\omega) + j_K(\omega). \quad (3)$$

Звідси

$$L_K(\omega) = L_{ж}(\omega) - L_{HC}(\omega), \quad (4)$$

$$j_K(\omega) = j_{ж}(\omega) - j_{HC}(\omega). \quad (5)$$

Порядок розрахунку бажаної ЛАФЧХ і вибір послідовного коригуючого пристрою:

1. Будується нескоригована ЛАФЧХ системи.
2. Виходячи з вимог до показників якості (s_m і t_p), визначається частота зрізу ω_c бажаної ЛАЧХ (рисунок 1, б).
3. Відкладається частота зрізу ω_c і проводиться ЛАЧХ з нахилом -20 дБ / дек в області частоти зрізу ω_c .
4. Будується ЛАЧХ в області низьких частот (виходячи з вимог до точності САК).
5. Визначається ЛАЧХ в області високих частот (збігається з нескоригованою або йде паралельно їй).
6. З'єднуються різні ділянки ЛАЧХ і визначається бажана ЛАЧХ $L_B(\omega)$.

7. Віднімається з бажаної ЛАЧХ $L_B(\omega)$ нескоригована $L_{НС}(\omega)$. В результаті виходить ЛАЧХ послідовного коригуючого пристрою $L_K(\omega)$.

8. Визначається передаточна функція коригувальної ланки і її параметри.

9. Вибираються типові ланки, що забезпечують задану реалізацію послідовного коригуючого пристрою.

10. Будується ЛФЧХ коригуючого пристрою.

11. Будується бажана ЛФЧХ, як сума ЛФЧХ нескоригованої САК і ЛФЧХ коригуючого пристрою.

Слід зазначити, що через обмеження фізичної реалізації коригуючої ланки її розрахункова ЛАФЧХ може не збігатися з дійсною, тоді слід уточнити бажану ЛАФЧХ.

Для перевірки розрахунку необхідно побудувати одним з методів перехідну характеристику скоригованої САК і порівняти показники якості перехідного процесу з заданими.

4. Синтез паралельного коригування

При використанні паралельного коригувального пристрою, систему можна представити як не охопльовану частину $W_{НО}(s)$ і частину схеми, охоплену зворотним зв'язком $W_K(s)$, тобто паралельним коригувальним пристроєм (рис. 3).

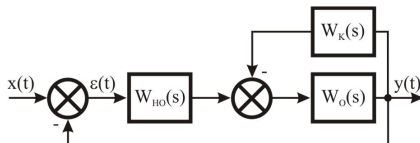


Рисунок 3 – САК, що охоплена зворотним зв'язком

Передаточна функція розімкнутої САК $W_P(s)$ записується у вигляді:

$$W_P(s) = \frac{W_O(s)}{1 + W_O(s)W_K(s)}, \quad (6)$$

де $W_{НО}(p)$ – передаточна функція частини САК, що не охоплена паралельним

коригувальним пристроєм;

$W_O(p)$ – передаточна функція тієї частини САК, що охоплена паралельним

коригувальним пристроєм;

$W_K(p)$ – передаточна функція паралельного коригувального пристрою.

Переходячи до логарифмічних характеристик, рівняння (6) прийме вид:

$$L_P(\omega) = L_{НО}(\omega) + L_O(\omega) - L\{1 + W_K(s)W_O(s)\} \quad (7)$$

$$j_P(\omega) = j_{НО}(\omega) + j_O(\omega) - j\{1 + W_K(s)W_O(s)\}. \quad (8)$$

Отже, якщо розімкнена логарифмічна амплітудно-частотна характеристика буде мати бажаний вид (бажана ЛАЧХ L_B), то передаточна функція коригувальної ланки визначається з рішення рівняння:

$$L\{1+W_K(s)W_O(s)\} = L_{HO}(w)+L_O(w)-L_B(w), \quad (9)$$

Завдання відшукування виду передаточної функції паралельного коригуючого пристрою або його ЛАФЧХ розбивається на два етапи.

1-й етап.

Визначається діапазон істотних частот, в якому

$$L_{HO}(w)+L_O(w)-L_{Ж}(w)=L_{HC}(w)-L_{Ж}(w) \gg 0, \quad (10)$$

тоді:

$$L\{1+W_K(s)W_O(p)\} \gg L\{W_K(s)W_O(s)\}=L_K(w)+L_O(w), \quad (11)$$

і на основі (9) отримуємо:

$$L_K(w)=L_{HO}(w) - L_B(w). \quad (12)$$

2-й етап.

В діапазоні неістотних частот:

$$L_{HC}(w) - L_B(w) \ll 0, \quad (13)$$

тоді

$$L\{1+W_K(p)W_O(p)\} \gg 1,$$

$$L_B(w) \gg L_{HO}(w)+L_O(w), \quad (14)$$

і в цьому діапазоні частот вид коригуючого пристрою не відіграє суттєвої ролі і може бути будь-яким.

Тому в діапазоні несуттєвих частот, передаточна функція коригувального пристрою повинна мати або найпростіший вид, або бути продовженням передаточної функції з області істотних частот.

Після визначення передаточної функції коригувального пристрою і її параметрів визначається остаточно вид бажаної ЛАФЧХ.

5. Порядок розрахунку паралельного коригуючого пристрою

1. Будується ЛАФЧХ не охопленої частини $L_{HO}(w)$, $j_{HO}(w)$ і охопленої $L_O(w)$, $j_O(w)$ частини системи. Будується ЛАФЧХ не коригованої САК $L_{HC}(w)=L_O(w)+L_{HO}(w)$, $j_{HC}(w)=j_O(w)+j_{HO}(w)$.

2. Будується бажана ЛАЧХ, що задовольняє заданим показникам якості.

3. Будується ЛАЧХ передаточної функції:

$$L_1(w) = L_{HO}(w) + L_O(w) - L_B(w) = L_{HC}(w) - L_{Ж}(w).$$

4. Визначається область істотних частот, тобто діапазон частот, в якому виконується умова:

$$L_1(w) = L_{HC}(w) - L_B(w) > 0. \quad (15)$$

В цьому діапазоні частот логарифмічна характеристика паралельного коригуючого пристрою дорівнює:

$$L_K(w) = L_1(w) - L_O(w) = L_{HO}(w) - L_B(w).$$

В діапазоні неістотних частот,

$$L_1(\omega) = L_{НС}(\omega) - L_B(\omega) < 0,$$

де логарифмічна характеристика паралельного коригуючого пристрою повинна мати найбільш простий вид, і, частіше всього, є продовженням з області істотних частот.

6. Приймається остаточний вид ЛАЧХ паралельного коригуючого пристрою і уточнюється бажана ЛАЧХ.

7. Для побудови уточненої бажаної ЛАФЧХ $L_B(j\omega)$, $j\omega$ необхідно:

- одним із методів побудувати замкнену ЛАФЧХ частини системи, що охоплена зворотним зв'язком $L_{ВК}(p)$, $j\omega$;

- побудувати бажану ЛАФЧХ за рівняннями:

$$L_B(\omega) = L_{НО}(\omega) + L_{ВК}(\omega),$$

$$j_B(\omega) = j_{НО}(\omega) + j_{ВК}(\omega).$$

6. Інваріантне керування

Розглянемо структурну схему замкнутої системи, що зображена на рисунку 4.

Помилка регулювання за завданням і збурення рівні відповідно (перенесемо місце для вкладання зовнішнього впливу на вхід системи):

$$E(s) = X(s) - Y(s) = X(s) - (X(s) + F(s)/W_1(s)) \cdot W_1(s) \cdot W_2(s) / (1 + W_1(s) \cdot W_2(s)); \quad (16)$$

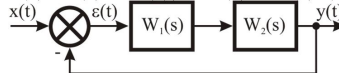


Рисунок 4- Структурна схема замкнутої системи

Як видно, помилка регулювання буде залежати як від параметрів самої системи, так і від вхідного впливу і впливів, що збурюють. Точність систем можна підвищити шляхом компенсації впливу сигналів керування і збурення за рахунок застосування комбінованого керування. При повній компенсації система виходить повністю інваріантна до зовнішніх впливів. При цьому підвищується порядок астатизму.

6.1 Системи, інваріантні до збурення

Розглянемо паралельну корекцію, шляхом ведення в систему по збуренню (рис. 5)

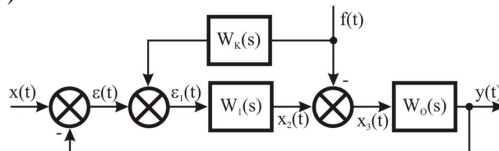


Рисунок 5 – САК з паралельною корекцією

Потрібно обрати таку коригуючу ланку W_k , щоб помилка по збуренню була рівна 0. Будемо вважати, що задаючий вплив $x(t)=0$, тоді:

$$\begin{aligned}
 E &= -Y = -W_2 x_3 = -W_2(x_2 - f) = -W_2 x_2 + W_2 f = w_2 f - W_2 W_1 e_1 = \\
 &= W_2 f - W_2 W_1 (e + W_k f) = W_2 f - W_2 W_1 e - W_2 W_1 W_k f, \\
 \varepsilon &= \frac{W_2 f (1 - W_1 W_2)}{1 + W_1 W_2}.
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

Щоб помилка була рівна нулю, потрібно $1 - W_1 W_k = 0$, або

$$W_k = \frac{1}{W_1}. \tag{18}$$

Нехай:

- 1) $W_1 = k$, тоді $W_k = 1/k$
- 2) $W_1 = k/(Ts+1)$, тоді $W_k = (Ts+1)/k$
- і т.д.

Чим більше порядок передаточної функції ланки W_1 , тим складніше реалізувати коригувальну ланку. Тому при великій складності частково задовольняються умови. При цьому система не буде повністю інваріантна до впливу, що збурює. Але вдається підвищити порядок астатизму.

ПРИКЛАД 1

Нехай система буде мати структуру як показано на рис. 6.

При повній інваріантності по збудженню передаточна функція коригуючої ланки повинна мати вид:

$$W_k = \frac{k_k s (T_{k1} s + 1)}{T_{k2} s + 1}$$

Через складність реалізації такої ланки зробимо спрощення:

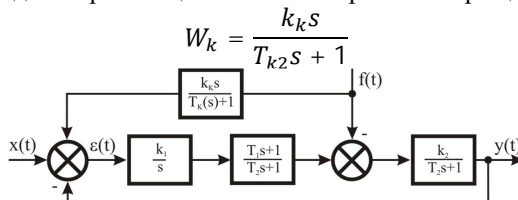


Рисунок 6 – Структурна схема автоматизації

Помилка нескоригованої системи буде мати вид:

$$E(s) = \frac{K_2 > F(s)}{(T_3 s + 1) \times \frac{\infty}{0} + \frac{K_2 K_1}{T_3 s + 1} \times \frac{T_1 s + 1}{p(T_2 s + 1)} \times \frac{0}{0}} = \frac{K_2 (T_2 s + 1) > F(s)}{(T_3 s + 1) (T_2 s + 1) s + K_2 K_1 (T_1 s + 1)} s$$

Як видно, система буде мати порядок астатизму рівний 1 (тобто система буде астатична тільки в статичному режимі).

Помилка скоригованої системи (по виведеному вище рівнянню для помилки):

$$E(s) = \frac{\frac{K_1 K_k (T_1 s + 1)}{(T_2 s + 1)(T_k s + 1)} \cdot \frac{K_2}{T_3 s + 1}}{\frac{K_2 K_1}{T_3^{p+1}} \times \frac{T_1^{p+1}}{p(T_2^{p+1})}} F(s) = \frac{\frac{T_1 T_k s + T_2 + T_k - T_1}{(T_k s + 1)} K_2}{(T_3 s + 1)(T_2 s + 1) s + K_2 K_1 (T_1 s + 1)} p^2 F(s)$$

де $K_k = 1 / K_1$ - порядок астатизму, збільшився на одиницю (таким чином помилка по положенню і по швидкості буде дорівнювати нулю). Якщо прийняти умову, що $T_2 + T_k = T_1$, то порядок астатизму ще збільшиться на одиницю.

Найчастіше на практиці передаточну функцію коригуючої ланки вибирають такою, щоб компенсувати помилки в статичному режимі і швидкісну помилку.

6.2 Системи, інваріантні по завданню

Розглянемо паралельну корекцію, уведена в систему по завданню (рис. 7).

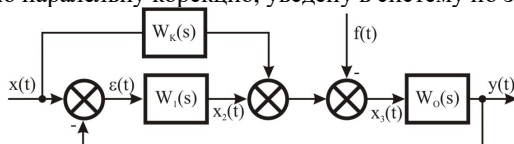


Рисунок 7 – Інваріантна система, з паралельною корекцією

Покладемо, що $F(s)=0$. Тоді:

$$e = x - y = x - W_2 x_3 = x - W_2 (x_2 + x W_k) = x - W_2 x_2 - W_2 W_k x = x (1 - W_2 W_k) - W_2 W_1$$

$$\varepsilon = x \frac{1 - W_1 W_2}{1 + W_1 W_2}$$

Для того, щоб помилка дорівнювала нулю, необхідно, щоб $1 - W_2 W_k = 0$, або:

$$W_k = \frac{1}{W_2} \tag{19}$$

Для систем, інваріантних по керуванню накладаються такі ж обмеження по реалізації як і для систем з коригуючими ланками. Так само на практиці найчастіше використовують такі ланки, які дозволяють скоригувати статичну і швидкісну помилку.

Інваріантне керування використовують найчастіше в системах, де ставиться вимога до високої точності вихідної координати (наприклад, в системах, що стежать).

ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Вивчення основних теоретичних відомостей до практичного заняття.
2. Виконати завдання до практичної роботи.

ЗАВДАННЯ ДО САМОСТІЙНОЇ ДОМАШНЬОЇ ПІДГОТОВКИ

1. Відновити знання по способам включення елементарних ланок САК.
2. Відновити знання по будові логарифмічних частотних характеристик [НП дисципліна ТОА].
3. Відновити теоретичні знання по визначенню передаточної функції по відомій логарифмічній частотній характеристиці. (Додаток Д)
4. Відповісти на контрольні запитання.
5. Вирішити завдання за варіантом.

ЗАВДАННЯ 1

По заданим показникам якості керування ($t_{пп} = 0,8$ сек.; $s = 25$ і $d = 0,005$) визначити основні параметри бажаної ЛАХ (K_u , $w_{зр}$, w_b , w_n) і побудувати її. Знайти ЛАЧХ коригувальної ланки і визначити її передаточну функцію, якщо відома ЛАЧХ системи автоматичного керування.

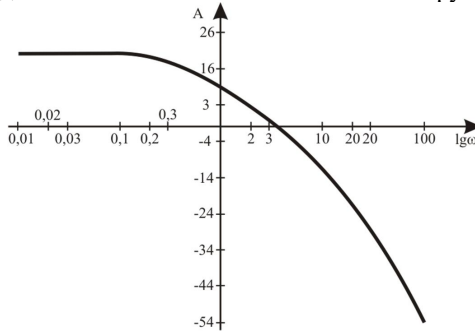


Рисунок 8 – ЛАЧХ реальної САК

ЗАВДАННЯ 2

По заданим показникам якості керування ($t_{пп} = 0,9$ сек.; $s = 30$ і $d = 0,006$) визначити основні параметри бажаної ЛАХ (K_u , $w_{зр}$, w_b , w_n) і побудувати її. Знайти ЛАЧХ коригувальної ланки і визначити її передаточну функцію, якщо відома ЛАЧХ системи автоматичного керування.

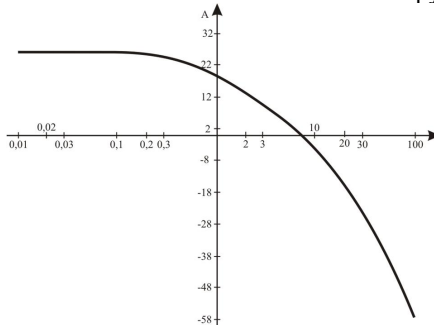


Рисунок 9 – ЛАЧХ реальної САК

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. У чому полягає суть синтезу САК?
2. Які форми синтезу САК існують?
3. Які вихідні дані необхідно знати для проведення корекції САК?
4. Як розрахувати і вибрати послідовний коригувальний пристрій?
5. Як розрахувати і вибрати паралельний коригувальний пристрій?
6. Чи можна коригувати САК зустрічно - паралельними ланками?
7. Що розуміється під бажаною ЛАЧХ?
8. Якими рекомендаціями необхідно керуватися, при побудові бажаної ЛАЧХ, при послідовній корекції?
9. Якими рекомендаціями необхідно керуватися при побудові бажаної ЛАЧХ при паралельній корекції?
10. Що розуміється під активною коригувальною ланкою?
11. Що розуміється під інваріантною САК?

ПРАКТИЧНА РОБОТА

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ НЕЛІНІЙНИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТА УСУНЕННЯ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ НЕЛІНІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В САК

Мета заняття: засвоїти існуючі методики визначення стійкості нелінійних систем автоматичного керування і способи усунення негативного впливу нелінійних елементів на роботу систем автоматичного керування

СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Загальних універсальних методів дослідження нелінійних систем не існує – дуже велика різноманітність нелінійностей. Однак, для окремих видів нелінійних систем розроблені ефективні методи аналізу і синтезу.

Метод гармонійної лінеаризації

Метод гармонійної лінеаризації призначений для подання нелінійної частини системи деякою еквівалентною передаточною функцією, якщо сигнали в системі можуть розглядатися, як гармонійні.

Цей метод може бути ефективно використаний для дослідження періодичних коливань в автоматичних системах, в тому числі, умов відсутності цих коливань, як шкідливих.

Характерним для методу гармонійної лінеаризації є розгляд одного нелінійного елемента. Нелінійні елементи можна поділити на статичні і динамічні. Динамічні нелінійні елементи (НЕ) описуються нелінійними диференціальними рівняннями і є набагато складнішими. Статичні НЕ описуються функцією $F(x)$.

Застосування методу гармонійної лінеаризації для дослідження нелінійних коливань - це найбільш поширене застосування даного методу.

В замкнутій САК, що складається з лінійної частини з передаточною функцією $W(s)$ і нелінійного елемента, що описується функцією $F(x)$, розглянемо умови виникнення коливального незгасаючого процесу, його амплітуду, частоту, форму та умови виникнення.

Нехай на вході нелінійного елемента (рис. 1) присутнє просте гармонійне коливання і нелінійний елемент задано функцією $F(x)$.

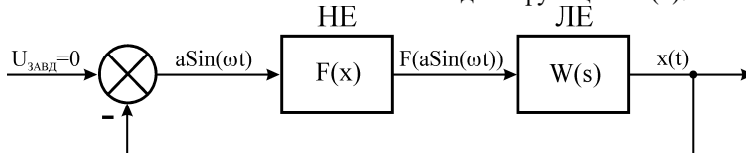


Рисунок 1 – Структурна схема з нелінійним елементом

Пройшовши через лінійну частину, вихідний сигнал надходить по колу від'ємного зворотного зв'язку на вхід системи, яку будемо для простоти вважати слідкуючою з нульовим задаючим впливом. Далі, перетворившись у нелінійному елементі, сигнал надходить на вхід лінійного елемента тобто замкнутий контур.

Періодичний сигнал $a\sin(\omega t)$, проходячи через нелінійність, залишається періодичним з тим же періодом і його можна розкласти в ряд Фур'є по гармоніках з кратною частотою (1).

$$F(a\sin(\omega t)) = a_0 + b_1\sin(\omega t) + a_1\cos(\omega t) + b_2\sin(2\omega t) + a_2\cos(2\omega t) + \dots \quad (1)$$

Коефіцієнти Фур'є обчислюються по відомим формулам (2), зауважимо лише, що коефіцієнти a_k і b_k залежать від амплітуди і частоти гармонійного сигналу $a\sin(\omega t)$. В кінцевому підсумку, це збереження характеру нелінійної залежності.

$$a_0 = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} F(a\sin(\omega t)) dt; \quad a_k = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} F(a\sin(\omega t)) \cos(k\omega t) dt; \quad (2)$$

$$b_k = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} F(a\sin(\omega t)) \sin(k\omega t) dt; \quad k > 0$$

Якщо додатково припустити, що нелінійність симетрична, тобто $F(-x) = -F(x)$, то постійна складова $a_0 = 0$.

Звернемося до частотної характеристики лінійної частини. Встановлено, що справедлива гіпотеза фільтру, якщо виконується нерівність:

$$|W(jn\omega')| \ll |W(j\omega')| \quad (3)$$

тут мається на увазі типова робоча частота системи ω' . Таким чином, припускаємо, що лінійна частина має фільтруючу властивість. Тому старші гармоніки на виході нелінійного елемента просто не проходять через лінійну частину, вони в ній притухають.

У цьому полягає гармонійна лінеаризація - відкидання старших гармонік на виході нелінійного елемента, тому що їх вплив занадто малий. При цьому враховується, що в лінійній частині різні гармоніки не взаємодіють між собою внаслідок лінійності.

Гіпотеза фільтру означає, що частотна характеристика лінійної частини досить швидко спадає (рис. 2).

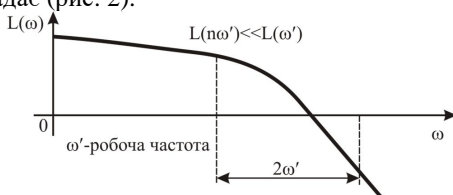


Рисунок 2 – Зовнішній вид частотної характеристики фільтру

Ступінь виконання гіпотези фільтру дозволяє оцінити похибку самого метода. Звичайно враховують, що, якщо друга і старші гармоніки складають $D\%$ від першої, то і похибка методу гармонійної лінеаризації складе теж величину $D\%$.

Після відкидання старших гармонік від (1) залишається такий вираз:

$$F(a\sin(\omega t)) \approx a q(a, \omega)\sin(\omega t) + a q'(a, \omega)\cos(\omega t) \quad (4)$$

де $q(a, \omega) = a_1/a$ і $q'(a, \omega) = b_1/a$ - коефіцієнти гармонійної лінеаризації.

Ці коефіцієнти описують зміну амплітуди і фази першої гармоніки сигналу при проходженні через НЕ. Залежність коефіцієнтів гармонійної лінеаризації від амплітуди і частоти можлива тільки в нелінійній системі, вона зберігає відбиток нелінійності, не знищуючи її, як при простій лінеаризації нелінійності. Саме тому можливо використовувати метод гармонійної лінеаризації для розрахунку істотно нелінійних коливальних процесів.

Коефіцієнти гармонійної лінеаризації узагальнюють звичайний коефіцієнт посилення лінійної ланки. Покажемо, як з їх допомогою визначити АФЧХ, що відповідає нелінійному елементу. Розглянемо проходження гармонійного сигналу через нелінійний елемент:

$$\begin{aligned} F(a\sin\omega t) &= b_1\sin\omega t + a_1\cos\omega t = b_1(a, \omega)\sin\omega t + a_1(a, \omega)\frac{d\sin\omega t}{dt} = \\ &= b_1(a, \omega)\sin\omega t + \frac{a_1(a, \omega)}{\omega} \cdot s\sin\omega t = \left(\frac{b_1(a, \omega)}{a} + \frac{a_1(a, \omega)}{a\omega} \cdot s\right)a\sin\omega t = \\ &= \left(q + \frac{q'}{a\omega} \cdot s\right)a\sin\omega t \end{aligned} \quad (5)$$

Це означає, що гармонійний сигнал, проходячи через нелінійний елемент, множиться на деякий операторний вираз, який природним чином, називається еквівалентною передаточною функцією нелінійного елемента:

$$\begin{aligned} W_{HE}(a, \omega, s) &= \frac{b_1}{a} + \frac{a_1}{a\omega} = q(a, \omega) + \frac{q'(a, \omega)}{\omega} \cdot s \quad (6) \\ W_{HE}(a, \omega, j\omega) &= q(a, \omega) + \frac{q'(a, \omega)}{\omega} \cdot j\omega = \operatorname{Re}W_{HE}(\omega) + j\operatorname{Im}W_{HE}(\omega) = \\ |W_{HE}(\omega)|e^{j\operatorname{arctg}W_{HE}(\omega)} &= \sqrt{q^2(a, \omega) + (q')^2(a, \omega)}e^{j\operatorname{arctg}W_{HE}(\omega)} = \\ &= \sqrt{q^2(a, \omega) + (q')^2(a, \omega)}e^{j\operatorname{arctg}\frac{\operatorname{Im}W_{HE}(\omega)}{\operatorname{Re}W_{HE}(\omega)}} \end{aligned} \quad (7)$$

Отримана передаточна функція (7) дозволяє також визначити еквівалентну АФЧХ нелінійного елемента.

Як правило, вид нелінійності пов'язаний з типовим ефектом у тому чи іншому елементі автоматики. Розглянемо деякі типові статичні нелінійності. Метод гармонійної лінеаризації дозволяє ефективно досліджувати не тільки східчасті недиференційовані (отже нелінеаризовані звичайним методом), зокрема гістерезисні.

Побудова кривих періодичних режимів в площині параметрів системи, що містить одну істотно нелінійну ланку.

Якщо САК містить істотно нелінійну ланку, то може виникнути необхідність досліджувати умови, при яких у системі виникають автоколивання, і знайти залежності амплітуди і частоти коливальних від основних

параметрів системи. Подібні дослідження зручно проводити шляхом побудови кривих періодичних режимів у площині основних параметрів системи.

Криві періодичних режимів можна представити у вигляді залежності амплітуди або частоти періодичного режиму від одного параметру системи.

Для цього потрібно записати рівняння у вигляді:

$$\begin{cases} X(\omega_n, A_n, k) = 0 \\ Y(\omega_n, A_n, k) = 0 \end{cases}$$

Звідки можна знайти залежність $A_n = f(k)$, $\omega_n = f(k)$.

ПРИКЛАД 1

Побудувати залежність амплітуди періодичного режиму від коефіцієнта передачі $k = k_{лжн}$, якщо нелінійна ланка має статичну характеристику, що наведена на рисунку 3.

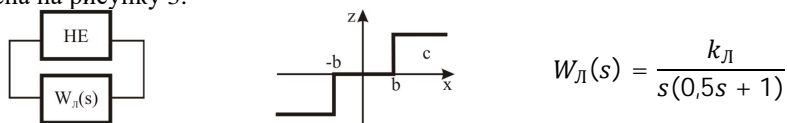


Рисунок 3 – Статична характеристика нелінійного елемента

Рішення

$$q(A/b) = \frac{4C}{\pi b} \cdot \frac{b}{A} \cdot \sqrt{1 - b^2/A^2}$$

$$k = 4C \frac{k_L}{\pi b}$$

$$q_{\text{ПР}}(A/b) = \frac{b}{A} \cdot \sqrt{1 - b^2/A^2}$$

Складаємо гармонійно лінеаризоване характеристичне рівняння нелінійної замкненої системи:

$$s \cdot (0,5s + 1)^2 + k_L \cdot k_H \cdot q_{\text{ПР}}(A/b) = 0$$

$$0,25s^3 + s^2 + s + k \cdot q_{\text{ПР}}(A/b) = 0$$

$$\begin{cases} -\omega^2 + k \cdot q_{\text{ПР}}(A/b) = 0 \\ -0,25\omega^3 + \omega = 0 \end{cases}$$

$$0,25\omega^2 = 1 \quad \omega^2 = 4$$

$$k \cdot q_{\text{ПР}}(A/b) = \omega^2 = 4$$

Застосовуємо критерій стійкості Гурвіца до характеристичного рівняння:

Коливальна межа стійкості: $D_2 = 0$, тобто

$$1 \cdot 1 - 0,25 \cdot k \cdot q_{\text{ПР}}(A/b) = 0$$

$$k \cdot q_{\text{ПР}}(A/b) = 1/0,25 = 4$$

$$k \cdot q_{\text{ПР}}(A/b) = k_{\text{КР}} = 4$$

$$k = k_{\text{КР}}/q_{\text{ПР}}(A/b) = 4/q_{\text{ПР}}(A/b)$$

Складаємо таблицю:

A/b	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
q _{пр} (A/b)	0	0,457	0,5	0,488	0,46	0,432	0,366	0,314	0,274	0,242
k	¥	8,75	8,00	8,17	8,70	9,26	10,90	12,70	14,60	16,50

За отриманою таблицею побудуємо графік залежності $A/b = f(k)$.

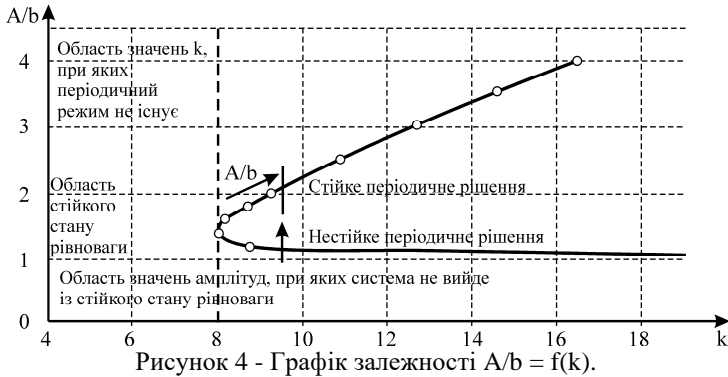


Рисунок 4 - Графік залежності $A/b = f(k)$.

Частотний метод визначення автоколивань. Метод Л. С. Гольдфарба

Амплітудо-фазова характеристика лінійної частини системи має вид:

$$W_L(j\omega) = R(j\omega)/Q(j\omega)$$

Амплітудо - фазова характеристика нелінійного елемента:

$$W_H(A) = q(A) + jq'(A)$$

Загальна наближена амплітудно-фазова характеристика розімкненого кола з нелінійною ланкою буде:

$$W(A, s) = W_H(A) \cdot W_L(s)$$

$$W(A, j\omega) = W_H(A) \cdot W_L(j\omega) = (q(A) + jq'(A)) \cdot W_L(j\omega)$$

Незгасаючі синусоїдальні коливання з постійною амплітудою і частотою в замкнутій системі визначаються по частотному критерію стійкості проходженням АФХ розімкненої системи через точку $(-1, j0)$, тобто рівністю $W(s, A) = -1$.

Це і буде в даному випадку умовою існування періодичного рішення для замкнутої нелінійної системи, яке приймається приблизно синусоїдальним.

Отже, маємо умову:

$$W(A, j\omega) = W_H(A) \cdot W_L(j\omega) = -1$$

$$W_L(j\omega) = -1/W_H(A)$$

$$W_H(A) = -1/W_L(j\omega)$$

(8)

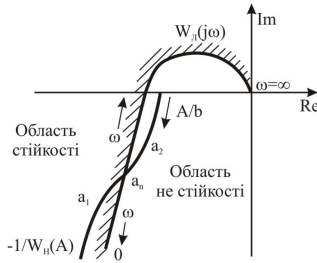


Рисунок 5 - АФХ лінійної частини системи і зворотної характеристики нелінійної ланки

Рішення рівняння (8) можна отримати графічно, як точку перетинання АФХ лінійної частини системи зі зворотною АФХ нелінійної ланки з протилежним знаком. Стійкість знайденого періодичного рішення грубо оцінюється так.

Дамо малий приріст амплітуди: $\Delta a_n + \Delta a_n$.

Тоді при додатному Δa_n отримуємо на кривій $-1/W_H(A)$ точку a_1 , а при від'ємному Δa_n - точку a_2 . Для стійкості періодичного рішення необхідно, щоб при додатному Δa_n колювання затухали, а при від'ємному Δa_n розходилися. Тоді згідно частотному критерію у випадку стійкості або нейтрального розімкнутого кола потрібно, щоб АФХ $W(A, j\omega)$ в першому випадку не охоплювала точку $(-1, j\omega)$, а в другому - охоплювала. Але загальна характеристика $W(A, j\omega)$ не будується.

Формулювання Гольдфарба стійкості періодичного рішення:

Для стійкого періодичного рішення, якщо лінійна частина стійка або нейтральна, потрібно щоб АФХ лінійної частини системи $W_L(j\omega)$ не охоплювала точку, що відповідає додатному приросту амплітуди (a_1), і охоплювала точку, що відповідає від'ємному приросту амплітуди (a_2). За цією ознакою графіки рис. 5 дають стійке періодичне рішення.

ПРИКЛАД 2

Методом гармонійної лінеаризації визначити амплітуду A_n і частоту ω_n автоколювань в нелінійній системі.

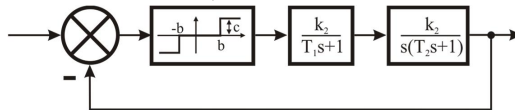


Рисунок 6 - Структурна схема нелінійної системи.

$$k_1 \times k_2 \times k_3 \approx 30 \text{ c}^{-1}; \quad T_1 = 0,6 \text{ c}; \quad T_2 = 0,1 \text{ c};$$

Передаточна функція лінійної частини системи:

$$W_L(s) = \frac{k_1 \cdot k_2}{s \cdot (T_1 s + 1) \cdot (T_2 s + 1)}$$

Комплексний коефіцієнт підсилення нелінійної ланки:

$$W_H(A/b) = k_H \cdot q_{\text{нр}}(A/b) = q(A/b)$$

$$q(A/b) = \frac{4C}{\pi b} \cdot \frac{b}{A} \cdot \sqrt{1 - b^2/A^2}$$

1. Основний спосіб визначення амплітуди і частоти автоколивання:

Складаємо гармонійно лінеаризоване характеристичне рівняння нелінійної замкнутої системи:

$$s \cdot (T_1 s + 1) \cdot (T_2 s + 1) + k_1 \cdot k_2 \cdot k_H \cdot q(A/b) = 0$$

$$s \cdot (0,6s + 1) \cdot (0,1s + 1) + 30 \cdot q(A/b) = 0$$

$$0,06s^3 + 0,7s^2 + s + 30 \cdot q(A/b) = 0$$

$$s = j\omega$$

$$-j0,06\omega^3 - 0,7\omega^2 + j\omega + 30 \cdot q(A/b) = 0$$

$$\begin{cases} -0,7\omega^2 + 30 \cdot q(A/b) = 0 \\ -j0,06\omega^3 + j\omega = 0 \end{cases}$$

$$\omega_n^2 = 1/0,06 = 16,666 \qquad \omega_n = 4,08 \text{ рад/с}$$

$$-0,7 \cdot 16,666 + 30 \cdot q(A/b) = 0$$

$$q(A/b) = 0,3888$$

$$\frac{b}{A} \cdot \sqrt{1 - b^2/A^2} = 0,39$$

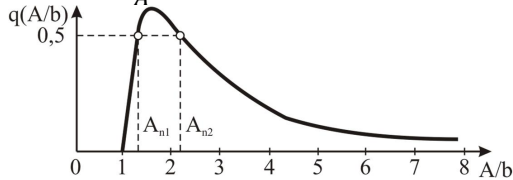


Рисунок 7 - Залежність $q(a/b) = f(A/b)$

З таблиці знаходимо $A_{n1} \approx 1,16\delta$ і $A_{n2} \approx 2,36\delta$. Через те, що амплітуда і частота періодичного рішення дійсні і додатні числа, то в нелінійній системі можливі автоколивання.

2. Частотний метод визначення автоколивань. Метод Гольдфарба.

Передаточна функція нелінійної розімкнутої системи:

$$W_H(s, A/b) = k_C \cdot W_L(s) \cdot q(A/b) \qquad k_C = k_L \cdot k_H$$

Умова існування автоколивань:

$$W_H(j\omega, A/b) = k_C \cdot W_L(j\omega) \cdot q(A/b) = -1$$

$$k_C \cdot W_L(j\omega) = -\frac{1}{W_H(A/b)} = -\frac{1}{q(A/b)}$$

Через те, що в системі керування можливі автоколивання, то існують точки перетинання цих кривих.

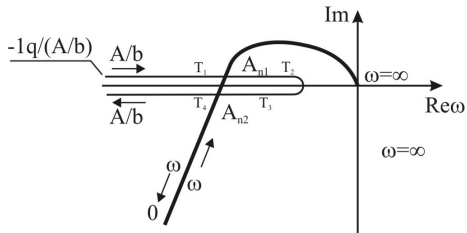


Рисунок 8 – Аналіз нелінійної системи

Стійкість періодичного рішення грубо оцінюється по приросту амплітуди.

Визначаємо стійкість системи згідно формулюванню Гольдфарба про стійкість періодичного рішення.

Розглянемо A_{n1} :

Точка 1 (T_1) відповідає від'ємному приросту амплітуди $A_{n1}-Da$, АФХ не охоплює точку 1.

T_2 відповідає додатному приросту амплітуди $A_{n1}+Da$, АФХ охоплює точку 2.

Отже, періодичне рішення з амплітудою A_{n1} нестійке.

Розглянемо A_{n2} :

T_3 відповідає від'ємному приросту амплітуди $A_{n2}-Da$, АФХ охоплює точку 3.

T_4 відповідає додатному приросту амплітуди $A_{n2}+Da$, АФХ не охоплює точку 4.

Отже, періодичне рішення з амплітудою A_{n2} стійке.

Висновок: система стійка в малому і автоколивальна в великому з $A_n = 2,36 \cdot b$ і $\omega_n = 4,08$ рад/с

ПРИКЛАД 3

З урахуванням заданої нелінійності провести аналіз САК за методом гармонійної лінеаризації та при наявності автоколивань визначити їх частоту та амплітуду.

Структурну схему САК з нелінійним елементом (рис. 9, а) приводимо до схеми, в якій виділено нелінійний елемент з передаточною функцією $W_H(s)$, а решта ланок, включаючи лінійну частину нелінійного елемента, утворюють лінійну частину системи з передаточною функцією $W_L(s)$ (рис. 9, б).

Добуток коефіцієнтів передачі ланок, що утворюють лінійну частину системи, є коефіцієнтом передачі лінійної частини системи K_L .

Метод гармонійної лінеаризації дозволяє лише визначити наявність або відсутність незгасаючих коливань у системі, тобто в підсумку стійкість системи. При наявності насичення процес, що розходиться, не може бути безмежним і досягає деякого граничного циклу, що має певну частоту

коливань. Ці коливання є несинусоїдальними і мають у різних точках кола регулювання різні ступені несинусоїдальності і різну амплітуду.

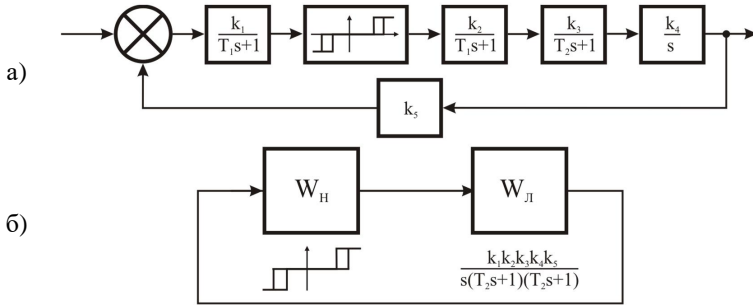


Рисунок 9 - Приклад структурної схеми САК з нелінійним елементом

Характеристичне рівняння для нелінійної САК замкнутої системи має вигляд:

$$W_H(A)W_L(j\omega) + 1 = 0$$

Якщо в результаті вирішення цього рівняння будуть отримані додатні дійсні значення частоти ω_0 і амплітуди A_0 , то в системі можливі автоколивання з цими параметрами.

Для графічного рішення характеристичного рівняння його перетворюють у вигляд:

$$W_L(j\omega) = -\frac{1}{W_H(A)}$$

Якщо на одному і тому ж кресленні і в однакових масштабах побудувати годографи $W_L(j\omega)$ і $-1/W_H(A)$, то їх перетин буде означати наявність автоколивань; при цьому частоту автоколивань можна отримати з годографа $W_L(j\omega)$, амплітуду - з годографа $-1/W_H(A)$.

Зручно проводити перевірку системи на наявність автоколивань в такому порядку:

1. Будуємо АФЧХ лінійної передаточної функції (годограф) $W_L(j\omega)$.

2. Будуємо годограф функції $-1/W_H(A)$. Передаточна функція $W_H(A)$ може бути представлена у вигляді:

$$W_H(A) = q(A) + jq\mathcal{A}(A)$$

де функції $q(A)$ і $q'(A)$, так звані коефіцієнти гармонійної лінеаризації, що мають наступний вигляд:

а) для нелінійності релейного типу з петлею гістерезису (рис. 10, а):

$$\left. \begin{aligned} q(A) &= \frac{4c}{\pi A} \sqrt{1 - \frac{B^2}{A^2}} \\ q'(A) &= \frac{4cB}{\pi A^2} \end{aligned} \right\} \text{при } A \geq B;$$

б) для нелінійності типу підсилювач з насиченням (рис. 10, б):

$$q(A) = \frac{2K}{\pi} \left(\arcsin \frac{B}{A} + \frac{B}{A} \sqrt{1 - \frac{B^2}{A^2}} \right) \left. \vphantom{\frac{2K}{\pi}} \right\} \text{при } A \geq B, K = \frac{c}{B};$$

$$q'(A) = 0$$

в) для нелінійності типу підсилювач з насиченням і зоною нечутливості (рис. 10, в):

$$q(A) = \frac{2K}{\pi} \left(\arcsin \frac{B_2}{A} - \arcsin \frac{B_1}{A} + \frac{B^2}{A} \sqrt{1 - \frac{B^2}{A^2}} - \frac{B_1}{A} \sqrt{1 - \frac{B_1^2}{A^2}} \right) \left. \vphantom{\frac{2K}{\pi}} \right\}$$

$$q'(A) = 0$$

при $A \geq B_1, K = \frac{c}{B_2 - B_1}$.

Функція $-1/W_H(A)$ представляється у вигляді

$$\frac{1}{-W_H(A)} = \frac{1}{q(A) + jq'(A)} = \frac{-q(A)}{q^2(A) + q'^2(A)} + j \frac{q'(A)}{q^2(A) + q'^2(A)} =$$

$$= \text{Re}(A) + j\text{Im}(A)$$

Годограф функції $-1/W(A)$ будуть, обчислюючи речову $\text{Re}(A)$ і уявну $\text{Im}(A)$ функції для різних A і відкладаючи отримані значення цих функцій по осях абсцис і ординат відповідно.

Розглянемо взаємне положення годографів $W_L(j\omega)$ і $-1/W_H(A)$ рис. 10.

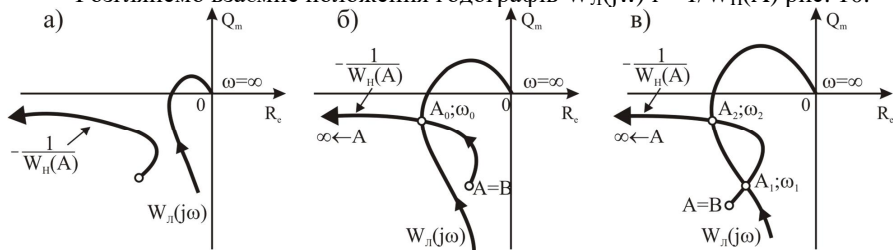


Рисунок 10 - Можливі взаємні розташування годографів

1. Якщо годографи не перетинаються, то в системі автоматичного керування виникнення коливань неможливе.

2. Якщо годографи перетинаються в одній точці, то в системі можливі незатухаючі коливання. Параметри автоколивань ω_0 і A_0 визначаються точкою перетину годографів: ω_0 за $W_L(j\omega)$ і A_0 по $-1/W_H(A)$.

3. Якщо годографи перетинаються в двох точках, то це свідчить про наявність двох режимів автоколивань: з більшою і меншою амплітудою. Режим з більшою амплітудою відповідає граничному циклу стійких коливань, режим з меншою амплітудою існувати не може і тому називається нестійким.

Для САК з іншими видами нелінійностей годографи будуть мати інший вигляд. Зокрема без петлевих нелінійностей коефіцієнт $q'(A) = 0$ і годограф $1/W_H(A)$ буде розташовуватися тільки на осі абсцис. Зауважимо, однак, що і в цьому випадку у міру збільшення A можливо рух кінця вектору функції $-1/W_H(A)$ спочатку в одну, а потім в іншу сторону і, отже, виникнення двох режимів коливань.

ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Вивчення основних теоретичних відомостей до практичного заняття.
2. Виконати завдання до практичної роботи.

ЗАВДАННЯ ДО САМОСТІЙНОЇ ДОМАШНЬОЇ ПІДГОТОВКИ

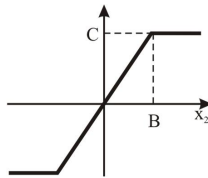
1. Відновити знання по принципу складання загального рівняння руху САК. [НІП дисципліна ТОА].
2. Вивчити властивості стандартних нелінійностей [НІП дисципліна ТОА].
3. Відновити знання з дисципліни вища математика по розкладанню функції в ряд Фур'є.
4. Відповісти на контрольні запитання.
5. Рішити завдання за варіантом.

ЗАВДАННЯ 1

Для принципової схеми автоматизації (рис. 9, а) з нелінійним елементом релейного типу з петлею гістерезису розрахувати нелінійну САУ за методом гармонійної лінеаризації, якщо $k_1 = 2,5$; $k_2 = 2,2$; $k_3 = 1,7$; $k_4 = 3,0$; $k_5 = 1,3$; $T_1 = 1$ с; $T_2 = 1,27$ с, а в якості нелінійного елемента використовується підсилювач з насиченням з параметрами $B = 1,2$; $C = 0,6$. Математичні залежності для нелінійного елемента:

$$q(A) = \frac{2K}{\pi} \left(\arcsin \frac{B}{A} + \frac{B}{A} \sqrt{1 - \frac{B^2}{A^2}} \right) \quad \text{при } A \geq B, \quad K = \frac{c}{B};$$
$$q'(A) = 0$$

Зовнішній вигляд нелінійного елемента:



ЗАВДАННЯ 2

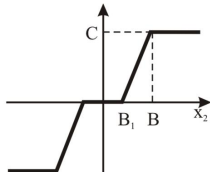
Для принципової схеми автоматизації (рис. 9, а) з нелінійним елементом релейного типу з петлею гістерезису розрахувати нелінійну САУ за методом гармонійної лінеаризації, якщо $k_1 = 4,0$; $k_2 = 2,5$; $k_3 = 4,6$; $k_4 = 3,7$; $k_5 = 2,3$; $T_1 = 0,8$ с; $T_2 = 1,48$ с, а в якості нелінійного елемента використовується підсилювач з насиченням і зоною нечутливості з параметрами $B_1 = 1,2$; $B = 1,2$; $C = 0,6$. Математичні залежності для нелінійного елемента:

$$q(A) = \frac{2K}{\pi} \left(\arcsin \frac{B_2}{A} - \arcsin \frac{B_1}{A} + \frac{B^2}{A} \sqrt{1 - \frac{B^2}{A^2}} - \frac{B_1}{A} \sqrt{1 - \frac{B_1^2}{A^2}} \right)$$

$$q'(A) = 0$$

при $A \geq B_1$, $K = \frac{c}{B_2 - B_1}$.

Зовнішній вигляд нелінійного елемента:



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке нелінійна система автоматичного керування?
2. У чому полягають принципи відмінності лінійних і нелінійних моделей систем автоматичного керування?
3. Що таке гармонійна лінеаризація нелінійного елемента?
4. При виконанні яких умов може бути застосована гармонійна лінеаризація нелінійного елемента для оцінки стійкості контуру за допомогою критерію Найквіста?
5. Які ознаки повинна мати нелінійна САК?
6. Які існують нелінійності в системах автоматики?
7. Які існують методи визначення стійкості нелінійних САК?
8. У чому полягає сутність дослідження нелінійних систем методом фазової площини?
9. Які існують методи дослідження нелінійних систем? Наведіть їх характеристику.
10. У чому полягає сутність дослідження нелінійних систем методом фазової площини? Що таке граничний цикл?
11. Що таке стійкий граничний цикл, нестійкий граничний цикл?
12. У чому полягає принципова різниця між автоколиваннями і незатухаючими коливаннями у лінійних системах?
13. У чому сутність методу гармонійного балансу?
14. Як визначити параметри автоколивань методом Гольдфарба?
15. У яких випадках метод гармонійного балансу виявляється недостатнім?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Корчемний М. О. Теоретичні основи автоматики : Навч. носібн. / М. О. Корчемний, П. Б. Клендій, М. В. Потапенко – Тернопіль : Навчальна книга – Богдан, 2011. – 304 с.
2. Бородин И. Ф. Основы автоматики и автоматизация производственных процессов / И. Ф. Бородин, Н. И. Кирилин М., Колос, 1977. - 328 с.
3. Мартыненко И. И. Автоматика и автоматизация производственных процессов / И. И. Мартыненко, Б. Л. Головинский, Р. Д. Проценко, Т. Ф. Резниченко. - М.: Агропромиздат, 1985.-335 с.
4. Бородин И. Ф. Практикум по основам автоматики и автоматизации производственных процессов / И. Ф. Бородин, Н. И. Кирилин. М., Колос, 1974. – 320 с.
5. Бохан Н. И. Основы автоматики и микропроцессорной техники: Учеб.пособие. / Н. И. Бохан, Р. И. Фурунжиев. - Мн.: Ураджай, 1987. - 376 с.
6. Бородин И. Ф. Автоматизация технологических процессов / И. Ф. Бородин, Н. М. Недилько. – М.: Агропромиздат, 1986. – 368 с.
7. Лобода О. І. Теоретичні основи автоматики. Конспект лекцій. Методичні вказівки з практичних робіт. [Електронний ресурс] / О. І. Лобода. – Режим доступу. : [www.http://nip.tsatu.edu.ua](http://nip.tsatu.edu.ua)

ВІРНІ ВІДПОВІДІ НА ТЕСТОВІ ЗАПИТАННЯ

№ тесту	Питання									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	2	1	3	1	3	4	2	2
2	2	1	3	1	1	4	2	1	1	1

Додаток А

Основні літерні позначення вимірюваних величин і функціональних ознак приладів

Позначення	Вимірювана величина		Функціональна ознака приладу		
	основне позначення вимірюваної величини	додаткове позначення, що уточнює вимірювану величину	відображення інформації	формування вихідного сигналу	додаткове значення
1	2	3	4	5	6
<i>A</i>	+	–	Сигналізація	–	–
<i>B</i>	+	–	–	–	–
<i>C</i>	+	–	–	Автоматичне регулювання, управління	–
<i>D</i>	Густина	Різниця, перепад	–	–	–
<i>E</i>	Електрична величина	–	+	–	–
<i>F</i>	Витрата	Співвідношення, частка, дріб	–	–	–
<i>G</i>	Розмір, положення, переміщення	–	+	–	–
<i>H</i>	Ручна дія	–	–	–	Верхня межа вимірюваної величини
<i>I</i>	+	–	Показання	–	–
<i>J</i>	+	Автоматичне перемикання, оббігання	–	–	–
<i>K</i>	Час, часова програма	–	–	+	–
<i>L</i>	Рівень	–	–	–	Нижня межа вимірюваної величини
<i>M</i>	Вологість	–	–	–	–
<i>N</i>	+	–	–	–	–
<i>O</i>	+	–	–	–	–
<i>P</i>	Тиск, вакуум	–	–	–	–

Продовження таблиці

1	2	3	4	5	6
<i>Q</i>	Величина, що характеризує якість: склад, концентрація	Інтеграція, підсумовування за часом	–	+	–
<i>R</i>	Радіоактивність	–	Реєстрація	–	–
<i>S</i>	Швидкість, частота	–	–	Включення, відключення, перемикання, блокування	–
<i>T</i>	Температура	–	–	+	–
<i>U</i>	Декілька різнорідних вимірюваних величин	–	–	–	–
<i>V</i>	В'язкість	–	+	–	–
<i>W</i>	Маса	–	–	–	–
<i>X</i>	Нерекомендована резервна буква	–	–	–	–
<i>Y</i>	+	–	–	+	–
<i>Z</i>	+	–	–	+	–


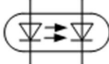
















Примітка. Літерні позначення з позначкою "+" - резервні, а з позначкою "-" - не використовуються

Додаток Б

Додаткові літерні позначення, які застосовуються для побудови перетворювачів сигналів, обчислювальних пристроїв

Найменування	Позначення
1 Вид енергії сигналу: електричний; пневматичний; гідравлічний	E P G
2 Види форм сигналу: аналоговий дискретний	A D
3 Операції, що виконуються обчислювальним пристроєм: підсумовування; множення сигналу на постійний коефіцієнт k ; множення двох і більше сигналів один на другий; ділення сигналів один на другий; зведення величини сигналу f до степеня n ; обчислення кореня степеня n з величини сигналу; логарифмування; диференціювання; інтегрування;	Σ k x $:$ f^n $\sqrt[n]{}$ lg dx/dt \int
зміна знаку сигналу; обмеження верхнього значення сигналу; обмеження нижнього значення сигналу	$x(-1)$ max min
4 Зв'язок з обчислювальним комплексом: передача сигналу в автоматизовану систему управління технологічним процесом; виведення сигналу з автоматизованої системи управління технологічним процесом	B_i B_o

Графічні позначення на принципових електричних схемах

Елемент	Умовне графічне позначення	Елемент	Умовне графічне позначення
Обмотка трансформатора, дроселя		Діодний оптрон	
Плавкий запобіжник		Замикаючий контакт	
Постійний резистор		Котушка електромагнітного пристрою	
Змінний резистор		Перемикач із складною комутацією	
Конденсатор постійної ємності		Інвертор	
Діод		Логічний елемент 2 "Або-ні"	
Стабілітрон		Логічний елемент "І"	
Світлодіод		Підсилювач	
Біполярний транзистор		Тригер	

Позначення деяких елементів принципів схем

Перша літера	Група видів елементів	Двох- і трьох буквене позначення	Види елементів
М	Двигуни		
Г	Генератори		
К	Реле, контактори, пускачі	КА КН КК КМ КТ КЛ	Реле струмові Реле вказівні Реле електротеплові Магнітні пускачі Реле часу Реле проміжні
С	Прилади комутаційні в колах керування, вимірювання і сигналізації	SA SF SB	Вимикачі, перемикачі Вимикач автоматичний Кнопковий вимикач
Q	Вимикачі в силових колах	QF QS QK	Вимикач автоматичний Роз'єднувач Короткозамикач
Н	Прилади сигналізації і індикації	НА НЛ HLG HLR HLA	Звукова сигналізація Світлова сигналізація Лампа сигн. з зеленою лінзою з червоною лінз. Табло сигнальне

ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ КОРИГУВАЛЬНОЇ ЛАНКИ ПО ЛАХ

Провести корекцію динамічних властивостей САК (рисунок Д.1) шляхом включення послідовної коригувальної ланки. Визначити її параметри, якщо вхідні дані нескоригованої системи:

$$T_1 = 2,5 \text{ с;}$$

$$T_2 = 0,08 \text{ с;}$$

$$T_3 = 0,025 \text{ с;}$$

$$T_4 = 0,015 \text{ с;}$$

$$K_1 = 1;$$

$$K_2 = 10;$$

$$K_3 = 2;$$

$$K_4 = 1;$$

$$t_{\text{пн}} \leq 4,5 \text{ сек}$$

$$s \leq 40 \%$$

$$d = 0,05$$

Рішення

Етап 1. Визначення передаточної функції розімкнутої системи.

При розмиканні системи, структурна схема якої представлена на рисунку Д.1, утворюється послідовним з'єднанням чотирьох ланок. Тому передаточна функція розімкнутої системи визначається як добуток передаточних функцій елементів по формулі:

$$W_{\text{роз}}(p) = \frac{K_1 K_2 K_3 K_4}{(T_1(p) + 1)(T_2(p) + 1)(T_3(p) + 1)(T_4(p) + 1)}$$

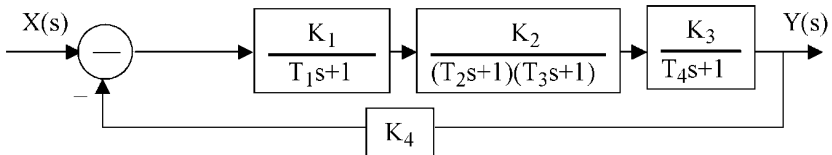


Рисунок Д.1 - Структурна схема системи керування

$$W_{\text{роз}}(p) = \frac{20}{(2,5p + 1)(0,08p + 1)(0,025p + 1)(0,015p + 1)}$$

Етап 2. Побудова $L_D(w)$

Отримати за допомогою програми симулятора ЛАХ досліджуваної САК з урахуванням, що $\omega_{c1} = \frac{1}{2,5} = 0,4 \text{ с}^{-1}$; $\omega_{c2} = \frac{1}{0,08} = 12,5 \text{ с}^{-1}$; $\omega_{c3} = \frac{1}{0,025} = 40 \text{ с}^{-1}$; $\omega_{c4} = \frac{1}{0,015} = 66 \text{ с}^{-1}$;

Етап 3. Побудова $L_6(w)$:

а) визначаємо частоту зрізу

$$\omega_{cp} = \frac{K\pi}{t} = \frac{5,8 \cdot 3,14}{4,5} = 4 \text{ с}^{-1},$$

де при $s \approx 40\%$ $K = 5,8$;

б) визначаємо w_n і w_b при $s = 40\%$

$$w_n = 0,2 \quad w_c = 0,2 \cdot 4 = 0,8; \quad w_b = 8 \quad w_{cp} = 32;$$

в) визначаємо K_b бажаної ЛАХ

$$K_{ж} = \frac{1 - \delta}{\delta} = \frac{1 - 0,05}{0,05} = 19,$$

враховуючи, що $K_b < K_d$ ($19 < 20$) приймаємо $K_b = 20$;

г) побудова $L_b(w)$.

Через точку $w_c = 4$ проводимо пряму з нахилом мінус 20 дБ/дек від $w_n = 0,8$ до $w_b = 32$. З'єднання $L_b(w)$ з низькочастотною частиною $L_d(w)$ проводимо прямою мінус 20 дБ/дек (фактично продовжуючи її) до частоти $w_1^K = 0,06$. З'єднання $L_b(w)$ і високочастотною частиною $L_d(w)$ проводимо шляхом копіювання $L_d(w)$ при частоті більше ніж w_b .

Етап 4. Побудова $L_k(w)$:

а) до частоти $w_1^K = 0,06$ дійсна і бажана ЛАХ збігаються, тому ніякої корекції проводити не треба. $L_k(w)$ йде по осі абсцис;

б) після частоти $w_1^K = 0,06$ $L_b(w)$ йде з нахилом мінус 20 дБ/дек, а $L_d(w)$ по прямій лінії паралельно осі абсцис. Необхідно скоректувати, "опустити" $L_d(w)$ за допомогою $L_k(w)$, тобто $L_k(w)$ від частоти $w_1^K = 0,06$ до $w_2^K = 0,4$ йде з нахилом мінус 20 дБ/дек;

в) після $w_2^K = 0,4$ нахили $L_d(w)$ і $L_b(w)$ збігаються. Обидві ЛАХ йдуть з нахилом мінус 20 дБ/дек, тому нахил $L_k(w) = 0$ від w_2^K до $w_3^K = 12,5$;

г) після $w_3^K = 12,5$ нахил $L_d(w)$ дорівнює мінус 40 дБ/дек, а $L_b(w) = -20$ дБ/дек. Необхідно "підняти" $L_k(w)$ до нахилу мінус 20 дБ/дек, тобто $L_k(w) = 20$ дБ/дек від $w_3^K = 12,5$ до $w_4^K = w_{03} = 32$;

д) після w_4^K $L_b(w)$ повністю "копіює" $L_d(w)$, тобто повторює її нахил. Змінювати ці нахили нема необхідності, і тому $L_k(w) = 0$ від $w_4^K = w_b$ до w_{∞} .

Етап 5. Визначення ПФ коригувальної ланки:

а) до частоти $w_1^K = 0,06$ коригувальна ЛАХ $L_k(w)$ йде по осі абсцис, значить $20 \lg K = 0$ або $K = 1$;

б) після частоти w_1^K $L_k(w)$ буде мати нахил - 20 дБ/дек. Це відповідає аперіодичній ланці з постійною часу $T_1 = 1/0,06 = 16,6$;

в) після частоти $w_2^K = 0,4$ $L_k(w)$ "випрямилася" і стала йти з нахилом 0 дБ/дек. Це випрямлення відповідає форсуючій ланці з $T_2 = 1/0,4 = 2,5$;

г) після частоти $w_3^K = 12,5$ $L_k(w)$ буде мати нахил 20 дБ/дек. Це знову відповідає форсуючій ланці з $T_3 = 1/12,5 = 0,08$;

д) після частоти $w_4^K = 36$ $L_k(w)$ знову змінила нахил з 20 дБ/дек до 0 дБ/дек. Це відповідає аперіодичній ланці з $T_4 = 1/36 = 0,027$;

е) загальна ПФ коригувальної ланки:

$$W_K(p) = \frac{K(T_2(p) + 1)(T_3(p) + 1)}{(T_1(p) + 1)(T_4(p) + 1)} = \frac{1(2,5p + 1)(0,08p + 1)}{(16,6p + 1)(0,027p + 1)}$$

В результаті отримуємо подвійну пружну ланку.

Етап 6. Спрощення ПФ коригувальної ланки.

Враховуючи, що високочастотна область ЛАХ впливає тільки на початок перехідного процесу, будемо вважати можливим спростити $L_K(\omega)$. Після ω_3^K $L_K(\omega)$ буде продовжувати йти без нахилу. Це показано на рисунку Д.2 пунктирною лінією.

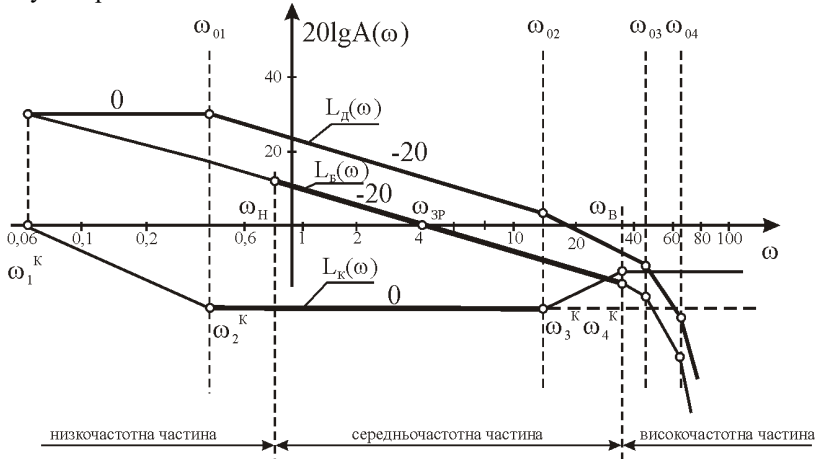


Рисунок Д.2 – Визначення ЛАХ коригувальної ланки

Спрощена коригувальна ланка тоді буде мати вид:

$$W_K(p) = \frac{(2,5p + 1)}{(16,6p + 1)}$$

В результаті отримуємо просту пружну ланку.

Етап 7. Включення ПФ коригувальної ланки в коло керування. Після включення спрощеної коригувальної ланки в коло керування ПФ розімкненої системи буде мати вид:

$$W_{\text{РОЗ}}(p) = \frac{20}{(2,5p + 1)(0,08p + 1)(0,025p + 1)(0,015p + 1)} \frac{(2,5p + 1)}{(16,6p + 1)}$$

або

$$W_{\text{РОЗ}}(p) = \frac{20}{(16,6p + 1)(0,08p + 1)(0,025p + 1)(0,015p + 1)}$$

В результаті отримуємо, що вид $W_{\text{РОЗ}}(p)$ залишиться таким же, тільки постійна часу самої інерційної ланки збільшиться з 2,5 с до 16,6 с.

Навчальне видання

ЛОБОДА О. І., ТОДОРІКО О. М., ДУБІНІА С.В.

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АВТОМАТИКИ
ПРАКТИКУМ**

**для підготовки здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр»
зі спеціальності 141
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»**

Підписано до друку 29.05.2020 р. Формат 60x86/16. Папір офсетний.
Друк цифровий. Гарнітура Times New Roman.
Умов. друк. арк. 9,3. Тираж 100 примірників. Замовлення № 3078.

Надруковано ФО-П Однорог Т. В.
72313, м. Мелітополь, вул. Героїв Сталінграда, 3а, тел. (098) 243 96 51
Свідцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до
Державного реєстру видавництв, виробників і розповсюджувачів видавничої продукції від
29.01.2013 р. серія ДК № 4477