

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

В.В.Зіновкін

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ
З дисципліни:

**« СУЧАСНІ МЕТОДИ АНАЛІЗУ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО
УПРАВЛІННЯ ТА РЕГУЛЮВАННЯ»**

(для аспірантів і магістрів всіх форм навчання).

Спеціальності:

141 - «Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка»

Освітньої програми 14:

«Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

Запоріжжя

2022

Конспект лекцій з дисципліни «Сучасні методи аналізу систем автоматичного управління та регулювання» (для аспірантів і магістрів всіх форм навчання) спеціальність: 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», Освітньої програми 14 «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод» Інженерно-фізичний інститут, Електротехнічний факультет. / Укл. В.В. Зіновкін. - Запоріжжя. НУ «Запорізька політехніка», 2022. - 43 с.

Укладачі: В.В.Зіновкін, проф., д.т.н.

Рецензент: Ю.О.Крисан, доц., к.т.н.

Відповідальний за випуск: А.В.Пирожок, доц., к.т.н.

Затверджено на засіданні кафедри ЕПА
Протокол № 11 від 10.06. 2022 р.

Рекомендоване до видання НМК ЕТФ
Протокол № 6 від 23.06 2022 р.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Структура та принцип роботи складних автоматизованих систем.....	5
1.1 Принципові основи функціонування автоматизованих систем	5
1.2 Побудова передавальної функції для розімкнутої та замкнутої системи по задаючому впливу та збурюю чому фактору	8
1.3 Аналіз систем автоматичного регулювання на стійкість за критеріями Гурвіца, Михайлова та Найквіста	11
1.4 Оцінка стійкості САР по кореню характеристичного рівняння...	12
1.5 Дослідження стійкості системи за критерієм стійкості Гурвіца...	15
1.6 Оцінка стійкості САР за критерієм Михайлова.....	18
1.7 Оцінка стійкості САР за критерієм Найквіста	21
2 Забезпечення якості керування шляхом синтезу систем автоматичного керування.....	26
2.1 Визначення параметрів за заданою похибкою або за умовою мінімуму інтегральної оцінки.....	26
2.2 Оцінка перехідного процесу за результатами моделювання.....	34
Перелік використаних джерел.....	42

ВСТУП

Конспект лекцій з сучасних методів аналізу систем автоматичного управління та регулювання потрібен для проведен-ня аналізу і синтезу систем автоматичного регулювання (САР), що містять контур з жорстким негативним зворотним зв'язком. З огляду на той факт, що розрахунок систем різної фізичної природи, що належать до певного класу, однаковий, запропонована САР кутовий швидкості двигуна постійного струму.

Система, призначена для розрахунку, є лінійною системою третього порядку, диференціальні рівняння кожної ланки якої можуть бути складені з застосуванням відомих у електромеханіки законів.

САР складається з регульованого об'єкта та елементів управління, які впливають на об'єкт при зміні однієї або декількох регульованих змінних. Під впливом вхідних сигналів управління або обурення) змінюються регульовані змінні. Мета регулювання полягає у формуванні таких законів, при яких вихідні регульовані змінні мало відрізнялися б від необхідних значень. Рішення даного завдання у багатьох випадках ускладнюється наявністю випадкових збурень (перешкод). При цьому необхідно вибрати такий закон регулювання, при якому сигнали управління проходили б через систему з малими спотвореннями, а сигнали шуму практично не пропускалися.

Даний матеріал дозволить студентам отримати навик дослідження одноконтурних систем управління на стійкість різними способами як з використанням ЕОМ, так і без їх використання.

1 СТРУКТУРА ТА ПРИНЦИП РОБОТИ СКЛАДНИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ

Аспірантам, магістрам і студентів необхідно по заданій принциповій схемі засвоїти принципові основи функціонування систем автоматичного регулювання та взаємні зв'язки між визначальними параметрами в статичних і динамічних навантаженнях електромеханічної системи.

1.1 Принципові основи функціонування автоматизованих систем

Будь-яка функціональна схема САР за відхиленням включає в себе об'єкт керування – ОУ з вихідною регульованою величиною $x(t)$ і збурюючим впливом – f ; пристрій керування – ПУ, що забезпечує із заданою точністю стабілізацію вихідної величини x , тобто $x(t)=x_0=\text{const}$; задаючий пристрій – ЗП, що забезпечує необхідне значення x_0 ; зворотний зв'язок – ЗЗ; порівнюючий підсумовуючий пристрій – ППП (див. рис. 1.1).

У свою чергу ПУ може складатися з підсилювального елемента, виконавчого пристрою і послідовної або паралельної корекції.

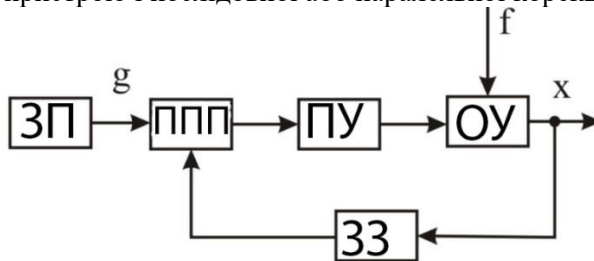


Рисунок 1.1 – Загальний вигляд функціональної схеми САР

Окрім того, в САР можливе додаткове регулювання по збурюючому фактору f , або задаючому впливу g або одночасно по збурюючому фактору і задаючому впливу (комбіноване керування).

ППП може бути реалізовано на операційному або електронному підсилювачі, магнітному або електромашинному підсилювачі, або на вимірювальному пристрої. Будь-які датчики, що перетворюють вихідну $x(t)$ регульовану величину ОУ в електричний сигнал утворюють головний зворотній зв'язок.

Вихідна принципова схема САР розбивається на окремі пристрої і вузли з урахуванням функцій, що вони виконуються. Необхідно пам'ятати, що в функціональній схемі САР, в прямій ланцюга проходження задаючого впливу g першим розташовується ЗУ, а ОУ – останнім (рис. 1.1).

Розглянемо приклад розробки функціональної схеми відповідно до принципової схеми САР частоти обертання ω електромеханічної системи з двигуном постійного струму, представленої на рис. 1.2, скласти.

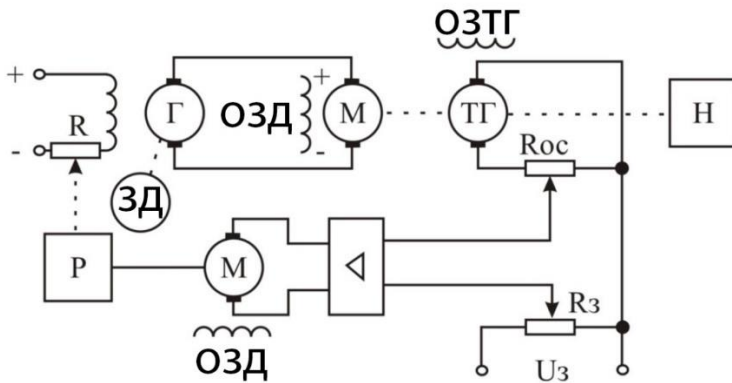


Рисунок 1.2 – Принципова схема САР частоти ω обертання ДПС

Задаючим пристроєм для функціонування САР є потенціометр $R_з$. В функціональній схемі він розміщується на першому місці (див. рис. 1.3). Згідно назви САР ОУ є ДПС, а його регульованою величиною – частота обертання ω . Тому в прямій ланцюга проходження сигналу $U_з$ він розташовується останнім. Напруга $U_з$ порівнюється з напругою $U_{оз}$ і по черзі по ходу дії сигналу проходить через електронний підсилювач ЕП, серводвигун СД, редуктор Р, генератор постійного струму Г і надходить на ДПС. Тахогенератор ТГ є датчиком, що перетворює

частоту ω в напругу U_{oc} , що знімається з потенціометра R_{oc} . Збурюючим фактором f в даній схемі САР є M_c .

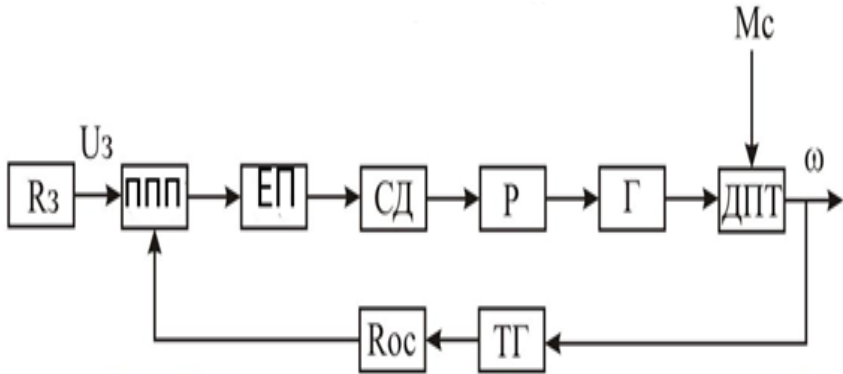


Рисунок 1.3 – Функціональна схема САР частоти ω обертання ДПС

Використовуючи правила структурних перетворень [1], необхідно отриману функціональну схему САР привести до вигляду структурної схеми, зображеної на рис. 1.4.

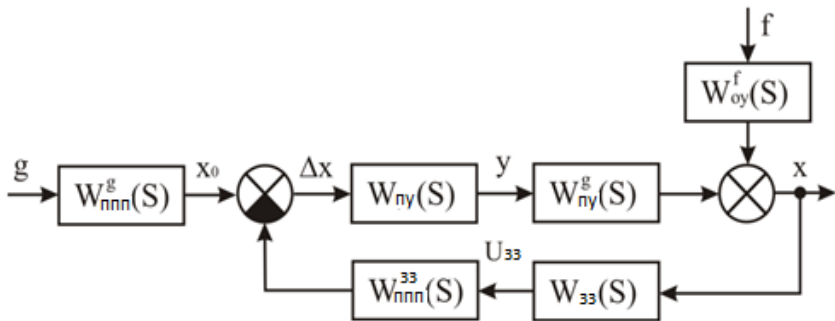


Рисунок 1.4 – Структурна схема САР

Таким чином встановлено, що в якості задаючого пристрою для забезпечення оптимального функціонування системи автоматичного регулювання доцільно використовувати потенціометричний пристрій R_3 . За його допомогою встановлюється першочергові функції

подальшої роботи системи в цілому. Як правило він розміщується на першому місці як показано на рис. 1.3 та 1.4. Регульованим параметром є частота обертання ω електричного двигуна. В якості датчика використовується тахогенератор ТГ. Він перетворює частоту обертання ω в напругу U_{oc} .

1. 2. Побудова передавальної функції системи по збурюючому фактору

Побудова передавальної функції в системах автоматизованого керування як для розімкнутої так і для замкнутої системи автоматизованого керування здійснюється по задаючому впливу та можливому зовнішньому збурюючому фактору. Для отримання передавальної функції розімкнутої систем $W_{PC}(s)$ складемо структурну схему розімкнутої САР. Для цього в структурній схемі:

- діють всі впливи і ланцюги, прилеглі до них;
- розривається головний ЗЗ (зворотній зв'язок), а її ланцюг є продовження прямої ланцюга проходження впливу g (рис. 1.5).

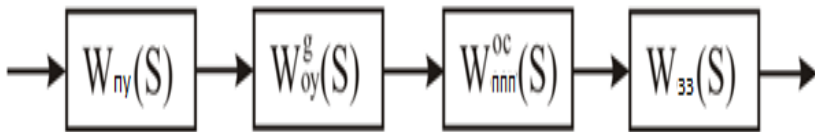


Рисунок 1.5 – Структурна схема розімкнутої САР

Тоді можемо записати вираз для передавальної функції розімкнутої системи в наступному вигляді:

$$W_{PC}(S) = W_{ny}(S) \cdot W_{oy}(S) \cdot W_{33}(S) \cdot W_{nnp}^{33}(S) \quad (1.1)$$

Для отримання передавальної функції замкнутої системи за допомогою одного з впливів скористаємося принципом суперпозиції. Структурна схема, для отримання передавальної функції замкнутої системи по задаючому впливу, представлена на рис. 1.6.

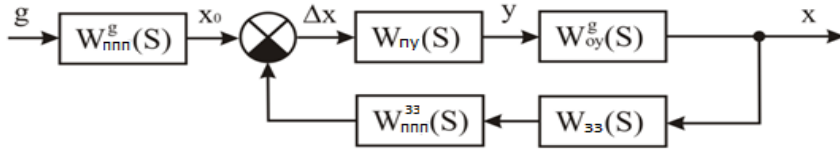


Рисунок 1.6 – Структурна схема САР по задаючому впливу

На підставі фізичного тлумачення і послідовності процесів, що відбуваються, запишемо вираз передавальної функції

$$W_{3C}^g(S) = \frac{W_{ny}(S) \cdot W_{ey}(S) \cdot W_{nnn}^g(S)}{1 + W_{ny}(S) \cdot W_{ey}(S) \cdot W_{33}(S) \cdot W_{nnn}^{33}(S)}. \quad (1.2)$$

В рівнянні 1.2 можна відзначити, що чисельником передавальної функції є передавальна функція $W_{np}^g(S)$ прямої ланцюга проходження сигналу g . Тому можна записати:

$$W_{3C}^g(S) = \frac{W_{np}^g(S)}{1 + W_{pc}(S)}. \quad (1.3)$$

Структурна схема для отримання передавальної функції замкнутої системи по збурюючому фактору представлена на рис. 1.7.



Рисунок 1.7 – Структурна схема САР по збурюючому фактору

Тоді вираз передавальної функції перетворюємо до виду:

$$W_{3C}^f(S) = \frac{W_{0Y}^f(S)}{1 - W_{YU}(S) \cdot W_{EY}^Y(S) \cdot (-1) W_{33}(S) \cdot W_{ППП}^{33}(S)}. \quad (1.4)$$

Або у вигляді, що відповідає електромеханічній системі, може бути представлено

$$W_{3C}^g(S) = \frac{W_{ПП}^f(S)}{1 + W_{PC}(S)}, \quad (1.5)$$

Де $W_{ПП}^f(S)$

– передавальна функція прямого ланцюга проходження збурюючого фактору.

Структурна схема для отримання передавальної функції замкнутої системи за похибкою регулювання

$$W_{3C}^\varepsilon(S)$$

представлена на рис. 1.8.

$$W_{3C}^\varepsilon(S) = \frac{W_{0Y}^g(S)}{1 + W_{YU}(S) \cdot W_{EY}(S) \cdot W_{OC}(S) \cdot W_{ППП}^{OC}(S)} = \frac{W_{ПП}^\varepsilon(S)}{1 + W_{PC}(S)}. \quad (2.6)$$

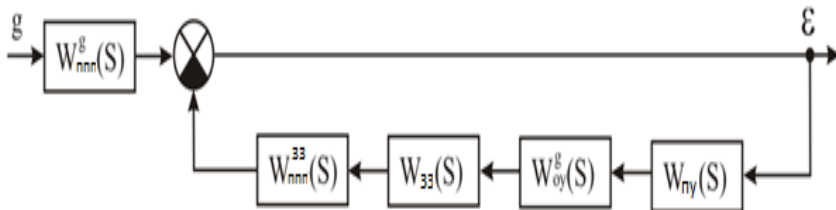


Рисунок 1.8 – Структурна схема САР за похибкою регулювання

Аналізуючи рівняння (1.4) - (1.6), можемо зробити висновок, що передавальна функція замкнутої системи за допомогою одного з впливів Z дорівнює дробу

$$W_{3c}(S) = \frac{W_{\text{пр}}^Z(S)}{1 + W_{\text{pc}}(S)}, \quad (1.7)$$

де $W_{\text{пр}}^Z(S)$ – передавальна функція прямої ланцюга проходження сигналу Z .

Отримані вирази передавальних функцій системи необхідно привести до двоповерхового дробного виразу.

В подальшому доцільно виконати моделювання електромагнітних та електромеханічних процесів в електромеханічній системі та представити результати дослідження з творчим аналізом та кваліфікованим захитом і поясненнями.

Таким чином для розробки математичної і комп'ютерної моделі необхідно ретельно складати відповідні передавальні функціональні ланцюги з прилеглими до них ланцюгів зворотніх зв'язків.

1.3. Аналіз систем автоматичного регулювання на стійкість за критеріями Гурвіца, Михайлова та Найквіста

Аспірант повинен отримати навички оцінювання функціонування САР на стійкість до впливу збурюючих чинників за основними критеріями (кореневий характеристичного рівняння, Гурвіца, Михайлова та Найквіста).

Основний режим будь-якої системи автоматичного керування (САК) – динамічний. При нормальній експлуатації автоматичні системи повинні підтримувати певний режим роботи об'єкта регулювання при дії на нього багатьох збурюючих факторів. Така поведінка може бути досягнута тільки в САК, що володіють стійкістю по відношенню до цих впливів. Стійкість системи означає, що малі зміни вхідного сигналу або будь-якого збурення початкових умов або установки не призведуть до значних відхилень вихідного сигналу. Таким чином, стійкість – це властивість системи повертатися у

вихідний або близький до нього сталий режим після виходу з нього в результаті будь-якої дії.

Найбільш розповсюджені фактори впливу на динамічний і статичний стан будь-якої електромеханічної системи і багато параметричних об'єктів є внутрішні неузгодженості. Вони виникають внаслідок скінчення термінів роботи як окремих візлів і комплектуючих, так і від порушення умов експлуатації.

Аналіз та моделювання систем автоматичного регулювання та керування на стійкість зручно здійснювати за критеріями Гурвіца, Михайлова та Найквіста в основі яких використовуються певні диференціальні рівняння.

1.4 Оцінка стійкості САР по кореню характеристичного рівняння

Коротко розглянемо можливий варіант аналізу електромеханічної системи. Отриману структурну схему САР (рис. 1.4) з відповідними передавальними функціями замкнутої системи по задаючому впливу $W_{3c}^g(S)$ і збурюючому фактору $W_{3c}^f(S)$, можна зобразити як показано на рис. рис. 1.9.

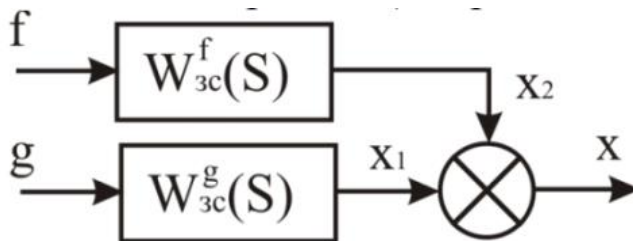


Рисунок 1.9 – Структурна схема САР із двома сигналами (задаючим та збурюючим)

Рівняння вихідного сигналу САР з величиною S представляємо в наступному вигляді:

$$X(S) = X_1(S) + X_2(S) = W_{3C}^g(S) \cdot G(S) + W_{3C}^f(S) \cdot F(S), \quad (1.8)$$

де $G(S)$, $F(S)$ – зображення задаючого $g(t)$ впливу і збурюючого фактору $f(t)$.

Отже, щоб знайти перехідні процеси, що протікають в САР, необхідно застосувати до рівняння (1.8) зворотне перетворення Лапласа:

$$\begin{aligned} X(t) &= L^{-1}[X_1(S) + X_2(S)] = L^{-1}[W_{3C}^g(S) \cdot G(S) + W_{3C}^f(S) \cdot F(S)] = \\ &= \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} W_{3C}^g(S) \cdot G(S) \cdot e^{st} ds + \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} W_{3C}^f(S) \cdot F(S) \cdot e^{st} ds. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Для визначення перехідного процесу використовується формула Хевісайда:

$$X(t) = U_0 \left[\frac{B(0)}{A(0)} + \sum_{i=1}^n \frac{B(S_i)}{s_i \cdot A'(S_i)} e^{S_i t} \right], \quad (1.10)$$

де U_0 – амплітуда вхідного впливу;

$A'(S_i)$ – значення похідної знаменника передавальної функції при відповідному значенні S_i ;

n – кількість коренів характеристичного рівняння системи.

З рівняння (1.10) можна відзначити, що час t та корені характеристичного рівняння входять в показник експоненти. Корені характеристичного рівняння системи (рис. 1.10) можуть бути дійсними (корінь S_1), комплексно-спряженими (S_2, S_3, S_7, S_8) та уявними (S_5, S_6).

Крім того, корені можуть розташовуватися: в лівій півплощині, в правій або на осі ординат і, відповідно, будуть лівими, правими або нульовими.

Система буде стійка, якщо перехідний процес при $t \rightarrow \infty$ прямує до сталого значення $X(\infty) = X_{вст}$. А це означає, що показник експоненти

рівняння 1.9 має бути негативним, тобто всі корені характеристичного рівняння системи повинні розташовуватися в лівій півплощині Si-коренів (рис. 1.10).

Для того, щоб САР була стійкою необхідно і достатньо щоб всі корені характеристичного рівняння системи знаходились у лівій частині графіка, що приведено на рис. 1.10.

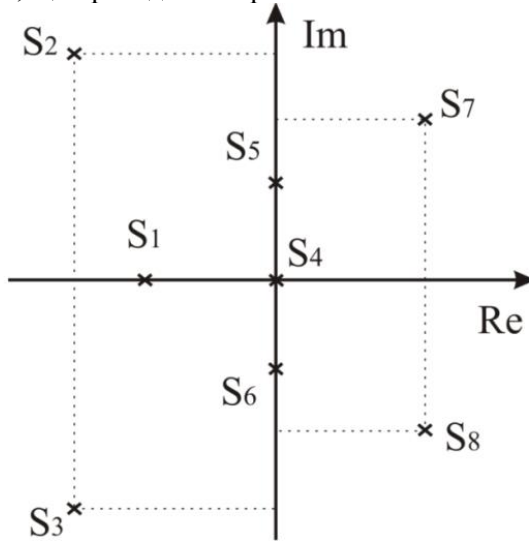


Рисунок 1.10 – Розташування Si-коренів характеристичного рівняння

Якщо серед коренів характеристичного рівняння системи є хоча б один правий, а інші ліві, то САР є нестійкою.

В якості прикладу розглянемо наступний випадок.

Нехай передавальна функція замкнутої САР має наступний вигляд:

$$W_{3C}(S) = \frac{59,2S+160}{0,14s^4+3,01s^3+15,31s^2+60,9s+161}. \quad (1.11)$$

В програмному продукті MatLab, використовуючи функцію pole() отримаємо значення коренів характеристичного рівняння компютерної системи

```
>> W=tf([59.2 160],[0.14 3.01 15.31 60.9 161])
```

Transfer function:

59.2 p + 160

0.14 p^4 + 3.01 p^3 + 15.31 p^2 + 60.9 p + 161

```
>> pole(W)
```

ans =

-16.1139

-0.6350 + 4.1153i

-0.6350 - 4.1153i

-4.1160

На підставі аналізу і розгляду результатів бачимо наступне.

Так як всі корені характеристичного рівняння знаходяться в лівій напівплощині, то система є асимптотично стійкою.

Аспірантам необхідно запропонувати своє бачення вирішення аналогічних моделей та виконати відповідне моделювання з логічним поясненням на підставі отриманих залежностей.

Таким чином автоматизована система керування буде стійкою при умові, що перехідний процес прямує до сталого значення $X(\infty) = X_{\text{вст}}$ при $t \rightarrow \infty$. А це означає, що всі корені характеристичного рівняння системи повинні розташовуватися в лівій півплощині Si-коренів відповідно до рис. 1.10.

1.5. Дослідження стійкості системи за критерієм стійкості Гурвіца

З літературних джерел відомо, що критерій стійкості Гурвіца є алгебраїчним. Він формулюється так: якщо характеристичне рівняння системи має вигляд

$$a_0 \cdot s^n + a_1 \cdot s^{n-1} + a_2 \cdot s^{n-2} + \dots + a_{n-1} \cdot s + a_n = 0. \quad (1.12)$$

При чому $a_0 > 0$, то для стійкості лінійної САР необхідно і достатньо, щоб були позитивні визначники Гурвіца і всі його діагональні мінори.

Визначник Гурвіца є квадратною матрицею n -го порядку:

Перший рядок містить всі непарні коефіцієнти до останнього, після чого рядок заповнюється до необхідного числа елементів нулями.

Другий рядок включає в себе всі парні коефіцієнти і теж закінчується нулями. Третій рядок формується з першої, а четвертий – з другої зміщенням вправо на один елемент. На місце, що звільнилося при цьому зліва, ставиться нуль.

Аналогічно, зміщенням вправо на елемент утворюються всі наступні парні та непарні рядки з попередніх однойменних рядків.

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & a_5 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & a_{n-1} & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & a_{n-2} & a_n \end{vmatrix}.$$

В результаті в головній діагоналі визначника виявляються послідовно записані всі коефіцієнти, крім a_0 .

Критерій стійкості Гурвіца раціонально застосовувати для рівнянь не вище четвертої і п'ятої ступенів.

Для рівнянь першого та другого ступенів необхідний критерій стійкості, що полягає у вимозі позитивності всіх коефіцієнтів рівняння, є і достатнім критерієм.

Отже, умова стійкості полягає в наступному: $a_0 > 0$; $a_1 > 0$; $a_2 > 0$.

Для рівняння третього ступеня виду

$$a_0 S^3 + a_1 S^2 + a_2 S + a_3 = 0 \quad (1.13)$$

При цьому, необхідно дотримуватися наступної умови:

$$a_0 > 0; \Delta_1 = a_1 > 0;$$

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

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 a_3 0 \\ a_0 a_2 0 \\ 0 a_1 a_3 \end{vmatrix} = a_3 \Delta_2 > 0. \quad (1.14)$$

Отже, в цьому випадку потрібно не тільки позитивність всіх коефіцієнтів характеристичного рівняння, а й дотримання умови $\Delta_2 > 0$.

Аналогічно можна отримати умови стійкості для рівняння четвертого ступеня у вигляді вимоги позитивності всіх коефіцієнтів характеристичного рівняння і $\Delta_3 > 0$.

Для рівняння четвертого ступеня:

$$a_0 S^4 + a_1 S^3 + a_2 S^2 + a_3 S + a_4 = 0; a_0 > 0; a_1 > 0; a_2 > 0; a_3 > 0; a_4 > 0;$$

$$a_1 a_2 a_3 > a_0 a_3^2 + a_1^2 a_4 \quad (1.15)$$

Для визначення значення критичного коефіцієнта ККР системи достатньо скористатися передостаннім визначником, і, прирівнявши його до нуля, знаходимо значення ККР.

Розглянемо випадок, що доволі часто трапляється при вирішенні науково-практичних задач.

Перевірити стійкість САР, що має характеристичне наступне рівняння:

$$S^4 + 8 S^3 + 18 S^2 + 16 S + 5 = 0;$$

$$\Delta_3 = a_1 a_2 a_3 - a_0 a_3^2 - a_1^2 a_4 =$$

$$= 8 \cdot 18 \cdot 16 - 1 \cdot 16 \cdot 16 - 8 \cdot 5 \cdot 5 = 1848 > 0;$$

$$K_{кр} = 1848.$$

Таким чином ця система автомати автоматичного регулювання буде стійкою.

Аспірантам доцільно створити алгоритм і виконати аналіз не стійкої системи автоматизованого регулювання і обґрунтувати вибране рішення.

1.6 Оцінка стійкості САР за критерієм Михайлова

Оцінка стійкості САР на підставі критерію Михайлова є частотним, і використовується для оцінки стійкості САР. Цей критерій необхідно отримати на підставі вирішення рівняння, так називаємої у літературних джерелах, кривої Михайлова. З цією метою скористаємося характеристичним рівнянням замкнутої системи (1.16) і представимо його у наступному вигляді:

$$A(s) = a_0 \cdot s^n + a_1 \cdot s^{n-1} + a_2 \cdot s^{n-2} +$$

$$\dots + a_{n-1} \cdot s + a_n = 0. \quad (1.16)$$

Переходимо в частотний діапазон. Для цього замінюємо $S_j \rightarrow \omega$ та виділяємо дійсну і уявну складові. Після не складних перетворень отримуємо рівняння кривої Михайлова у зручному для подальшого дослідження, вигляді:

$$D(j\omega) = a_0 \cdot (j\omega)^n + a_1 \cdot s(j\omega)^{n-1} + a_2 \cdot (j\omega)^{n-2} +$$

$$\dots + a_{n-1} \cdot (j\omega) + a_n =$$

$$= U(\omega) + jV(\omega), \quad (1.17)$$

де $U(\omega)$, $V(\omega)$ – дійсна і уявна складові рівняння кривої Михайлова.

Крива Михайлова будується за рівнянням (3.11) в комплексній площині як показано на рис. 1.11) для кожного випадку.

Для того, щоб САР була стійкою необхідно і достатньо виконання наступних умов:

- при $\omega = 0$ годограф кривої Михайлова повинен починатися з позитивної дійсної осі;
- при зміні частоти $\omega = 0$ до ∞ годограф кривої Михайлова повинен:
 - по чергово змінювати квадранти;
 - не проходити через нуль;
 - рухатись в позитивному (проти годинникової стрілки) напрямку;
 - пройти n квадрантів.

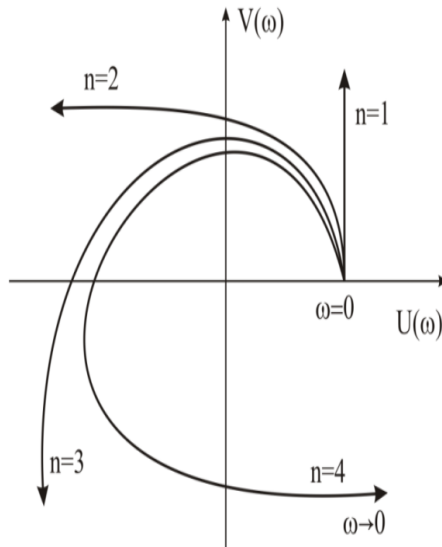


Рисунок 1.11 – Криві Михайлова, побудовані для $n=1$, $n=2$, $n=3$, $n=4$

Якщо годограф кривої Михайлова за відповідної частоти не дорівнює нулю, проходить через початок координат, то система є нейтральною. При невиконанні хоча б одного із сформульованих умов система є нестійкою.

В якості прикладу запишем знаменник передавальної функції $W_{3C}(S)$ замкнутої системи із рівняння (1.11) в наступному представленні:

$$A(s) = 0,14 \cdot s^4 + 3,01 \cdot s^3 + 15,31 \cdot s^2 + \dots + 60,9 \cdot s + 161 \quad (1.18)$$

Зробимо заміну $S=jw$:

$$A(jw) = 0,14 \cdot w^4 + 3,01 \cdot jw^3 + 15,31 \cdot w^2 + \dots + 60,9 \cdot jw + 161 \quad (1.19)$$

Розіб'ємо частотну характеристику на дійсну і уявну частини:

$$\begin{aligned} A(j\omega) &= P(\omega) + j \cdot Q(\omega) \\ P(\omega) &= 0,14 \cdot \omega^4 - 15,31 \cdot \omega^2 + 161 \\ Q(\omega) &= -3,01 \cdot \omega^3 + 60,9 \cdot \omega \end{aligned} \quad (1.20)$$

Використовуючи вбудовану функцію `plot()` в MatLab побудуємо годограф Михайлова і визначимо стійкість системи:

```
>> w=0:0.01:10
>> p=0.14*w.^4-15.31*w.^2+161
>> q=-3.01*w.^3+60.9*w
>> plot(p,q)
```

>> grid

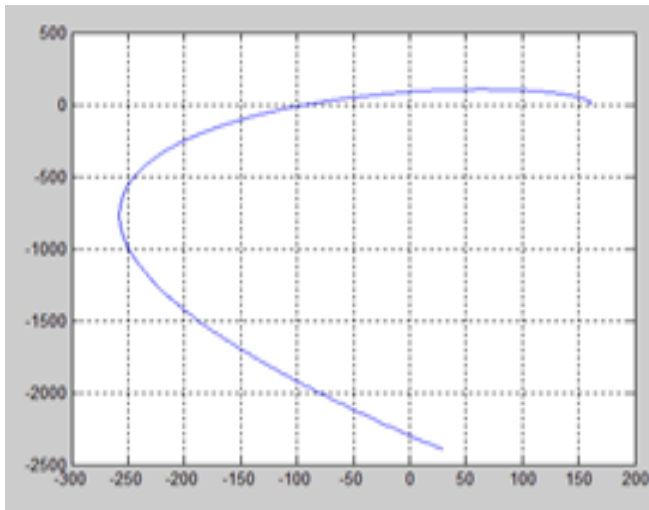


Рисунок 1.12 – Годограф Михайлова

Виходячи з отриманого годографа Михайлова (рис. 1.12) видно, що система стійка, оскільки годограф починається на дійсній позитивній осі і проходить проти годинникової стрілки n -квадрантів, де n -порядок системи.

В даному випадку, що розглядається $n = 4$.

1.7 Оцінка стійкості САР за критерієм Найквіста

Цей критерій є частотним, і для оцінки стійкості САР необхідно скористатися передавальною функцією розімкненої системи. Перейшовши в частотний діапазон (замінивши $s \rightarrow j\omega$), необхідно побудувати годограф АФЧХ розімкненої системи. Особливістю даного критерію є те, що по вигляду годографа АФЧХ розімкненої системи оцінюється стійкість САР в замкнутому стані.

Система автоматичного керування в розімкнутому стані може бути стійкою або нестійкою або нейтральною. Тому існує два підходи в оцінці стійкості системи.

I. Підхід. Система в розімкнутому стані стійка. Якщо система в розімкнутому стані стійка, то для того, щоб вона була стійкою і в замкнутому стані, необхідно і достатньо щоб годограф АФЧХ розімкнутої системи не охоплював точку з координатами $[-1; j0]$.

Якщо годограф АФЧХ розімкнутої системи охоплює точку з координатами $[-1; j0]$, то система в замкнутому стані є не стійкою.

І, якщо годограф АФЧХ розімкнутої системи проходить через точку з координатами $[-1; j0]$, то система в замкнутому стані є нейтральною, тобто знаходиться на межі стійкості.

На рис 1.13 прийнято наступні позначення:

1 – САК в замкнутому стані є стійкою, для 2 – нейтральної, для 3 – нестійкою.

Для виконання науково-технічних досліджень необхідно вільно володіти теоретичними знаннями функціонування складних електромеханічних систем. При цьому їх доцільно розглядати як багато параметричними з параметрами різної фізичної природи.

Розглянемо інший варіант. Система в розімкнутому стані є нестійкою або нейтральною.

В даному випадку, в характеристичному рівнянні розімкнутої системи серед лівих коренів є хоча б один правий корінь або нульовий.

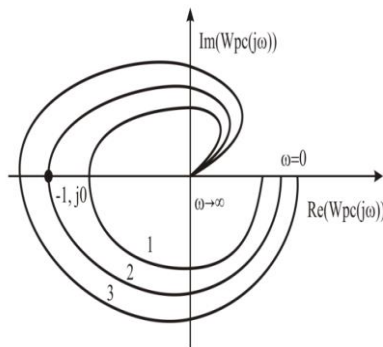


Рисунок 1.13 – Годографи АФЧХ розімкнутої системи

Якщо система в розімкнутому стані є нестійкою або нейтрально, то для того, щоб вона була стійкою і в замкнутому стані, необхідно і достатньо щоб годограф АФЧХ розімкнутої системи охоплював точку з координатами $[-1; j0]$ в позитивному напрямку $K/2$ раз, де K – кількість правих чи лівих коренів.

На рис. 1.14 зображений годограф АФЧХ нестійкої розімкнутої системи, яка має один правий корінь.

Годограф АФЧХ охоплює точку з координатами $[-1; j0]$ в позитивному напрямку 0,5 рази, отже, система в замкнутому стані є стійкою.

В якості прикладу доцільно розглянути інший випадок. Нехай передаточна функція розімкнутої системи має такий вигляд:

$$W_{PC}(S) = \frac{59,2S+160}{0,14s^4+3,01s^3+15,31s^2+60,9s+161} \quad (1.21)$$

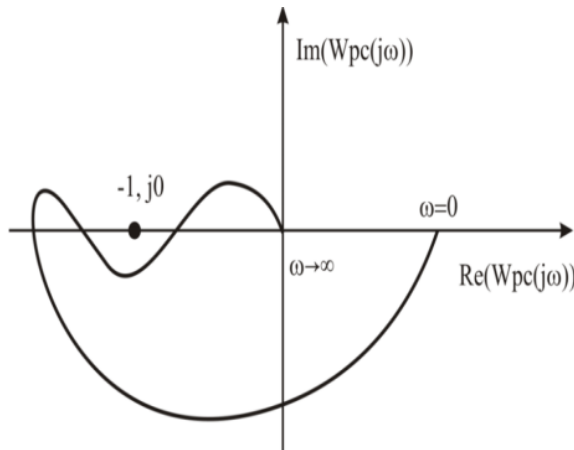


Рисунок 1.14 – Годограф АФЧХ розімкнутої системи при $K=1$

Використовуючи вбудовану функцію `nyquist()` в MatLab побудуємо годограф Найквіста і визначимо стійкість системи:

```
>> W=tf([59.2 160],[0.14 3.01 15.31 60.9 161])
```

Transfer function:

$59.2 p + 160$

$0.14 p^4 + 3.01 p^3 + 15.31 p^2 + 60.9 p + 161$

```
>> nyquist(W)
```

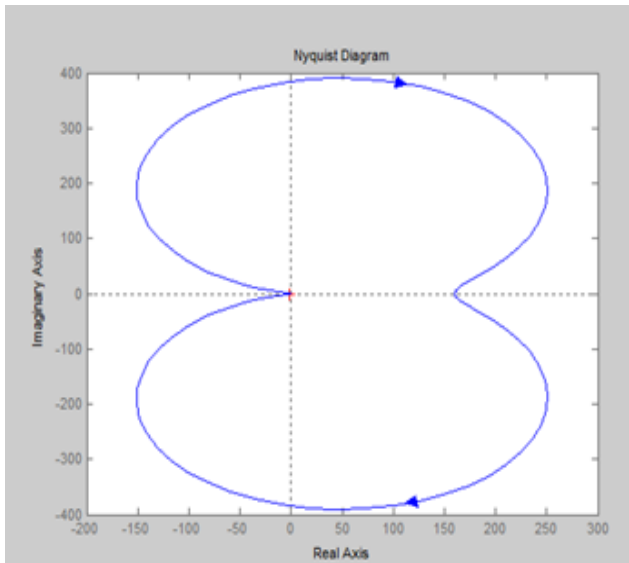


Рисунок 1.15 – Годограф Найквіста

Так як на рисунку 1.15 не видно точки з координатою $(-1; j0)$, тому важко оцінити стійкість системи.

Для того щоб оцінити стійкість наблизовано годограф так, щоб було видно точку з координатою $(-1; j0)$.

Необхідно відзначити, що такі дослідження потребують кваліфікованого персоналу з інженерною інтуїцією, яка базується на набутті практичного і творчого досвіду. Наявність такого досвіду сприяє свідомому вибору певного теоретичного і методологічного підходу, що сприяє успішному вирішенню поставленого завдання. З цієї метою, в даному курсі, необхідно творчо підходити до розгляду

характерних рис і підходів, що приведені у конспекті лекцій і практичних прикладів, та самостійно доповнювати знання з літературних джерел. Це пояснюється тим, що в літературних джерелах приведено низку оригінальних рішень в залежності від специфіки призначення і конструктивного рішення електромеханічної системи чи інших об'єктів.

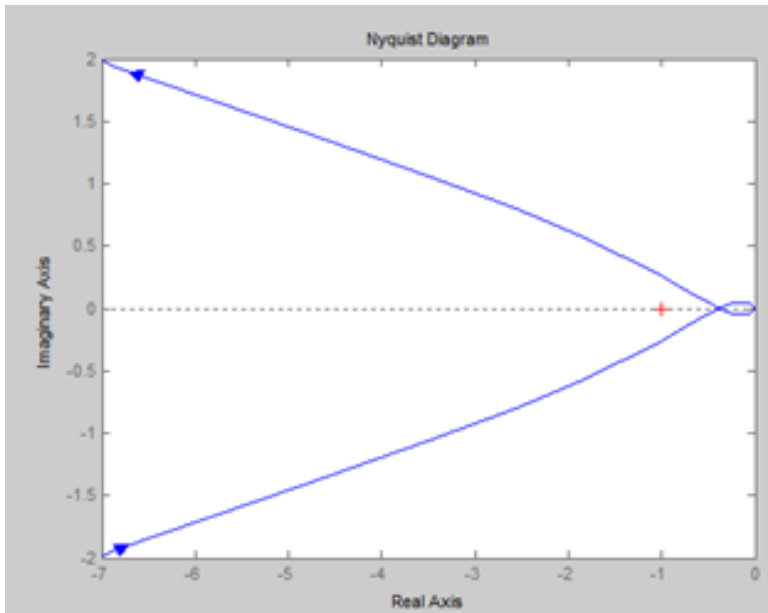


Рисунок 1.16 – Годограф Найквіста

Так як годограф Найквіста (рис. 1.16) розімкнутої системи не охоплює точку з координатою $(-1; j0)$, то замкнута система є стійкою.

Таким чином, використовуючи певні теоретичні положення можливо досягти відповідної якості систем керування в залежності від вимог промисловості. Доцільно відзначити, що не варто домогатись досягти високої точності, якщо технічно досягти такої точності технологічного процесу практично не можливо.

В подальшому розглянемо деякі шляхи забезпечення певної точності систем автоматичного керування і управління.

2.ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ КЕРУВАННЯ ШЛЯХОМ СИНТЕЗУ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

На підставі розглянутих вище теоретичних основ досягнення стійкості систем автоматичного керування для різного технічного призначення видно, що якщо система в розімкнутому стані є нестійкою або нейтральною, то для того, щоб вона була стійкою і в замкнутому стані, необхідно і достатньо проаналізувати годограф АФЧХ.

В донному розділі розглянемо деякі приклади, що досить часто використовуються на практиці та в наукових дослідженнях.

2.1 Визначення параметрів за заданою похибкою або за умовою мінімуму інтегральної оцінки

Визначення передавального коефіцієнта розімкнутого контуру за заданою похибкою або за умовою мінімуму інтегральної оцінки є першочерговою дією перед науковим дослідженням або вирішенням практичного завдання. Коротко розглянемо методологічний процес аналізу автоматизованих систем керування певним технічним засобом або складною електромеханічною системою.

На рис. 1.14 зображений годограф АФЧХ нестійкої розімкнутої системи, яка має один правий корінь. Процес синтезу зазвичай включає в себе наступні операції.

1. Побудова реальної ЛАЧХ. Під реальною ЛАЧХ розуміється характеристика вихідної системи керування, яка побудована виходячи з вимог, що пред'являється до точності режимів стабілізації або стеження, до потужності на виході системи і т.п. Зазвичай під вихідною системою розуміється система, що складається з керованого об'єкта і керуючого пристрою і не до завдань синтезу відноситься процедура визначення структури і параметрів системи в цілому або окремих її ланок за заданими показниками якості. Найпростішими з яких є завдання визначення передавального коефіцієнта розімкнутого контуру за заданою похибкою або за умовою мінімуму інтегральної оцінки.

У загальному випадку при проектуванні САК необхідно визначити як алгоритмічну (передавальні функції ланок системи керування, характер прямих і зворотних зв'язків), так і конструктивну структуру, тобто вирішити задачу повного синтезу. Також необхідно виконати синтез коригувальних або компенсуючих пристроїв, що додаються в основний контур системи послідовно з іншими ланками або у вигляді зворотного зв'язку.

Найбільшого поширення набув метод визначення структури і параметрів коригувальних ланок по ЛАЧХ, забезпечена необхідними коригуючими пристроями, що забезпечували би необхідну якість перехідного процесу.

2. Побудова бажаної ЛАЧХ. Бажаною називають асимптотичну ЛАЧХ розімкнутої системи, що має бажані (необхідні) статичні і динамічні властивості. Бажана ЛАЧХ складається з трьох основних асимптот: низькочастотної, середньочастотної і високочастотної. Крім того, можуть бути спряжені асимптоти, які з'єднують основні.

Низькочастотна ділянка $L_0(\omega)$ зумовлює точність системи в сталому режимі. Вихідними даними для побудови на цій ділянці служать необхідний порядок астатизма і величина похибки, що допускається при заданому законі зміни вхідного впливу.

Середньочастотна ділянка визначає швидкодію і коливання системи. Параметри середньочастотної ділянки (нахил, частота зрізу, ширина) вибираються за заданим значенням перерегулювання і тривалості перехідного процесу.

Високочастотна ділянка слабо впливає на характер перехідного процесу. На його положення звертають увагу, коли на систему діють високочастотні перешкоди.

В області низьких частот $L_0(\omega)$ являє собою пряму, що проходить через точку з координатами $L(\omega) = 20 \lg K$ і $\omega = 1$, K – розрахунковий за умовами точності загальний коефіцієнт передачі розімкнутого контуру; θ – заданий порядок астатизма.

Середньочастотна ділянка бажаної характеристики повинна мати нахил – 20 дБ/дек і перетинати вісь частот. Частоту зрізу вибирають в залежності від заданих значень перерегулювання δ і тривалості перехідного процесу t_n .

Практично встановлено, що при $w_1 \geq 2w_{зр}$ перехідний процес замкнутої системи другого порядку буде без перегулювання. В результаті дослідження автоматичних систем з різним видом ЛАЧХ встановлено, що коливальність перехідного процесу буде найменшою, якщо частота зрізу розімкнутої системи ($w_{зр}$) знаходиться на ділянці ЛАЧХ з нахилом -20 дБ / дек.

Якщо перехідний процес в системі закінчується за 1-2 коливання, то час перехідного процесу можна визначити за наближеною залежністю:

$$t_{\Pi} \approx (1 \dots 2) \frac{2\pi}{w_{зр}}. \quad (2.1)$$

Частоту зрізу можливо визначити і за наближеною формулою:

$$\omega_{зр} = (2 \dots 4)\pi / t_n. \quad (2.2)$$

Межі середньочастотної ділянки ω_2 і ω_3 вибирають з таких міркувань: чим ширше ділянка з нахилом - 20 дБ / дек, тим більший запас стійкості і менше коливальності в системі.

На практиці прийнято праву межу ω_3 приймати рівною $\omega_3 = (2 \div 4)\omega_{зр}$, а ліву - $\omega_2 = (0,5 \div 0,25)\omega_{зр}$. Якщо крім t_n заданий показник коливальності M , то граничні частоти $\omega_2 = (M - 1)\omega_{ср}/M$; $\omega_3 = (M + 1)\omega_{ср}/M$.

Високочастотна частина характеристики $L_G(\omega)$ будують так, щоб різниця нахилів її асимптот не перевищувала 20 дБ / дек. Бажано, щоб, починаючи з деякої великої частоти характеристики $L_p(\omega)$ і $L_k(\omega)$ збігалися (або були паралельні), в цьому випадку коригуючий пристрій виходить найбільш простим.

3. Визначення виду і параметрів коригувального пристрою. Найбільш дієвим способом надання системи автоматичного керування необхідних динамічних властивостей є введення в неї додаткового елементу. Він виправляє, коригує властивості вихідної системи і називається коригуючим пристроєм.

Коригуючий пристрій включають в систему автоматичного керування різним чином. В курсовій роботі необхідно реалізувати за

допомогою послідовного включення коригуючого пристрою в пряму ланцюга системи. У цьому випадку найбільш просто визначається передавальна функція коригувального пристрою.

Послідовний коригуючий пристрій включають безпосередньо після датчика неузгодженості або ж після попереднього підсилювача. Так як передавальна функція бажаної розімкнутої системи визначається як:

$$W_6(p) = W_p(p)W_k(p), \quad (2.3)$$

де $W_k(p)$ – передавальна функція коригувального пристрою послідовного типу;

$W_p(p)$ – передавальна функція реальної розімкнутої системи.

Звідси можна визначити $W_k(p)$:

$$W_k(p) = \frac{W_6(p)}{W_p(p)}. \quad (2.4)$$

Рівняння ЛАЧХ в цьому випадку матиме вигляд

$$20\lg|W_k(jw)| = 20\lg \left| \frac{W_6(jw)}{W_p(jw)} \right| \quad (2.5)$$

Або

$$L_k(w) = L_6(w) - L_p(w). \quad (2.6)$$

Розглянемо можливу реалізацію синтезу САР на прикладі схеми системи стеження за умови $M_c=0$, що приведена на рис.2.1.

Передавальна функція розімкнутого ланцюга буде дорівнювати добутку передавальних функцій окремих ланок:

$$W(p) = W_1(p) W_2(p) W_{3.1}(p) W_{3.3}(p) W_4(p) = \frac{K}{p(T_y p + 1)(T_m p + 1)}, \quad (2.7)$$

де $K = k_1 k_2 k_3 k_4$ – загальний коефіцієнт підсилення розімкнутого кола.

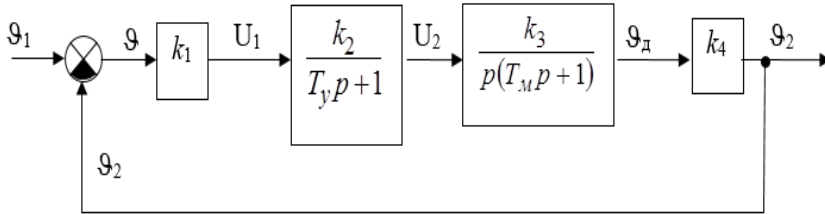


Рисунок 2.1 – Структурна схема дистанційної системи стеження

Для розгляду процесу приймаємо наступні значення поточних величин:

1) постійні часу мають значення:

- $T_y = (1/300)$ с;

- $T_m = 0,05$ с;

2) за технічним завданням потрібно забезпечити точність спостереження за командним сигналом або директивним завданням g_1 , що змінюються з постійною швидкістю:

- $\omega_1 = 200$ о/с;

- допустимою швидкісною похибкою $g_{cm} = g_1 - g_2 \leq 0,5$ о.

Час перехідного процесу САР не повинен перевищувати 0,2 с.

Співвідношення між швидкісною похибкою g_c , постійною швидкістю зміни командного сигналу ω_1 і добротністю системи по швидкості K для систем з астатизмом першого оцінюємо за наступною формулою:

$$g_c = \frac{\omega_1}{K} \leq g_c^m \quad (2.8)$$

За формулою (2.8) визначимо нижню межу коефіцієнта K :

$$K_{\min} = \frac{\omega_1}{g_c^m} = 400 \text{ c}^{-1} \quad (2.9)$$

Із знайдених умов системи проводиться побудова реальної асимптотичної ЛАЧХ розімкненої системи відповідно до представленої на рис. 2.2.

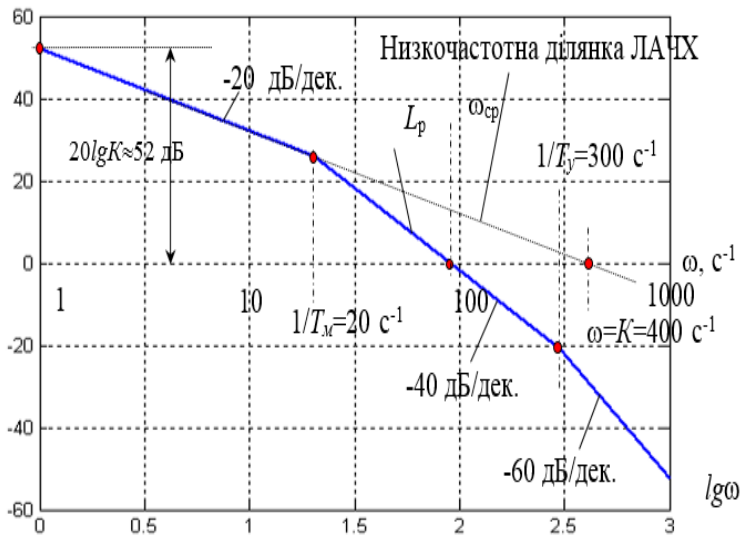


Рисунок 2.2 – Реальна ЛАЧХ розімкнутої системи

Порядок побудови бажаної ЛАЧХ і ЛАЧХ коригувального пристрою полягає в наступному (для рис.2.3):

Визначаємо значення частоти зрізу відповідно до формули (2.2)

$$\omega_{зр} = \frac{(2...4)\pi}{t_n} = \frac{3\pi}{0,2} \approx 50 \text{ (c)}^{-1} \quad (2.10)$$

Визначаємо межі середньочастотної ділянки:

$$\omega_2 = \frac{1}{T_2} = (0,5 \div 0,25)\omega_{зр} = 15,9 \text{ с}^{-1}; \quad (2.11)$$

$$\omega_4 = \frac{1}{T_4} = (2 \div 4)\omega_{зр} = 150 \text{ с}^{-1}. \quad (2.12)$$

Середньочастотна ділянка за результатами побудови по горизонталі знаходиться на рівні 10 дБ и -10 дБ.

Під кутом (нахилом) -20 дБ/дек через точку $\omega_{зр}$ проводимо пряму до перетину із частотою ω_2 і ω_4 . Точки закінчення середньочастотної ділянки позначимо як а) і б) – точки перетину середньочастотної ділянки з високочастотною і низькочастотною відповідно.

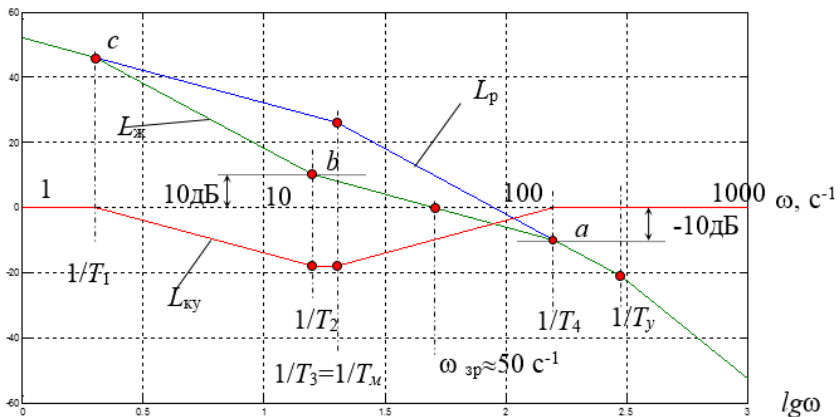


Рисунок 2.3 – Побудова бажаної ЛАЧХ і ЛАЧХ коригуючого пристрою

Спряжуємо (з'єднуємо) середньочастотну вітку ЛАЧХ з низькочастотною асимптотою з нахилом -40 дБ/дек. (точка с).

Будуємо асимптотичну ЛАЧХ коригувального пристрою за формулою $L_k(\omega) = L_0(\omega) - L_p(\omega)$.

Виразуємо постійні часи T_1, T_2, T_3, T_4

Таким чином, отримали передавальну функцію коригуючого пристрою

$$w_{ky}(p) = \frac{(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)}{(T_1 p + 1)(T_4 p + 1)} \quad (2.14)$$

з параметрами:

- $T_1 \approx 0,5$ с;
- $T_2 \approx 0,06$ с;
- $T_3 \approx 0,05$ с;
- $T_4 \approx 0,006$ с.

Після знаходження передавальної функції коригуючого пристрою необхідно здійснити моделювання системи з коригуючим пристроєм в системі Matlab Simulink і побудувати перехідну характеристики системи.

На рис. 2.4 показана перехідна характеристика скоригованої САУ. Перехідний процес $\vartheta_2(t)$ до моменту $t=t_{\pi}$ входу графіка в п'ятивідсоткове відхилення закінчується приблизно за одне коливання.

Час закінчення перехідного процесу $t_{\pi} \approx 0,12$ с.

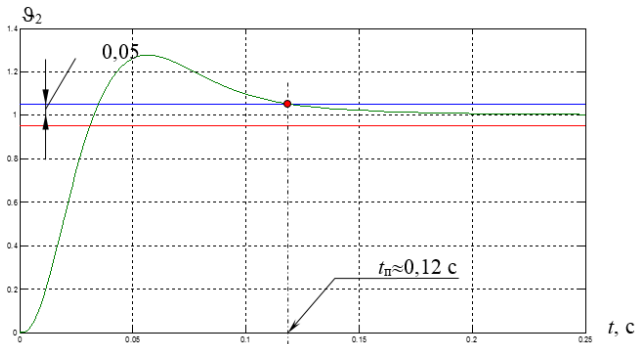


Рисунок 2.4 – Перехідна характеристика скоригованої САУ

Аналіз існуючих існуючої систем автоматизованого управління і керування показав, що їх створення і практичне використання пов'язано її характерними рисами, конструкцією, призначенням, умовами функціонування, впливом зовнішніх і внутрішніх факторів та

ін. Тому їх принцип роботи суттєво пов'язаний і залежить від характерних рис об'єкта, що досліджується або працює в реальних умовах.

При цьому для вирішення різних завдань необхідно забезпечувати відповідну точність як функціонування самої системи так і дотримання певних фізичних параметрів відносно номінальних.

На практиці доволі часто трапляються випадки коли очікуваний або директивний режим не відповідає дійсному, що має місце в технологічному процесі. Це сприймається як не дотримання технологічних факторів технологічного комплексу або установки. При детальному розгляді причин і наслідків виявляється, що причиною виявляються датчики зйому первинної інформації, або неузгодженість по частотним характеристикам, пошкодженням передавальних ланцюгів, мікропроцесорних та програмних засобів, вплив зовнішніх факторів, та погіршення якості електричної енергії та ін. Тому в першу чергу доцільно виконувати аналіз дійсних параметрів в порівнянні з директивними, а потім шляхом перехресного аналізу параметрів системи автоматичного керування і регулювання встановлювати пошкодження. До таких прийомів відносяться експериментальні та комп'ютерні дослідження, контрольні іспити окремих вузлів і пристроїв, фізико-математичне моделювання та ін.

2.2 Оцінка якості перехідного процесу за результатами моделювання

За результатами моделювання необхідно скласти відповідну пояснювальну записку з приведенням схеми дослідження, допоміжних мікропроцесорних і програмних засобів, безпосередньо отриманих результатів та їх коментарем і обґрунтуванням. Особливу увагу необхідно приділяти поясненням якості перехідного процесу САР з коригуючим та при його відсутності і запропонувати відповідні висновки з певними пропозиціями.

Якість процесу повинна бути проаналізована за такими параметрами як величина перерегулювання $\sigma, \%$, час перехідного процесу t_p та похибка регулювання Δu .

Схильність системи до коливань, а отже, і запас стійкості можуть бути охарактеризовані максимальним значенням керованої величини $y_{\max}$ або, так званим, пере регулюванням

$$\sigma\% = \frac{y_{\max} - y(\infty)}{y(\infty)} 100\%, \quad (2.15)$$

де $y(\infty) \neq 0$ представляє собою стає значення керованої величини після завершення перехідного процесу.

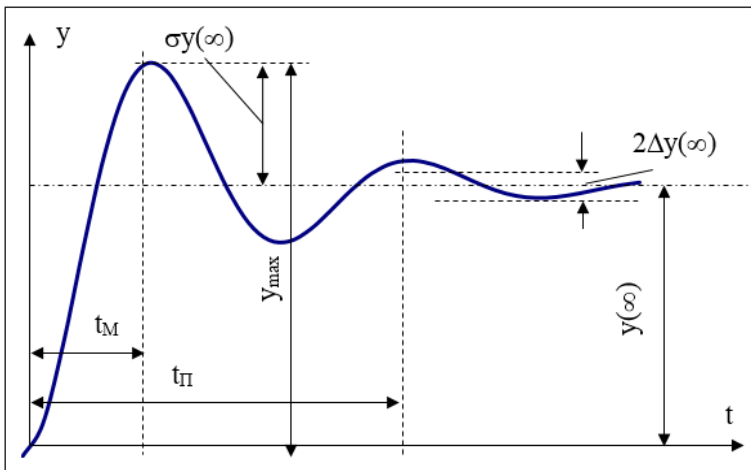


Рисунок 2.5 – Графік перехідного процесу з показниками його якості

У більшості випадків вважається, що запас стійкості є достатнім, якщо величина пере регулювання не перевищує (10 ... 30)%. Однак в деяких випадках потрібно, щоб перехідний процес протікав взагалі без пере регулювання, тобто був монотонним.

Швидкодія системи може визначатись по продовжності часу перехідного процесу t_P . Продовжність часу перехідного процесу t_P знаходиться як час, що протікає від моменту приложення на вхід одиночного стрибка до моменту, після якого має місце нерівність у визначальному рівнянні.

Швидкодія системи визначається по тривалості перехідного процесу t_P .

Тривалість перехідного процесу визначається як час від моменту надходження на вхід одиночного сигналу до моменту, після якого має місце нерівність

$$|y(t) - y(\infty)| \leq \Delta \cdot y(\infty) = \Delta_1, \quad (2.16)$$

де Δ_1 – задана мала постійна величина, яка представляє допустиму похибку.

Як правило, вона дорівнює

$$\Delta = 0,01 \dots 0,05.$$

На схемі рис..2.6 – температура печі (регульована величина);

θ_3 – задане значення температури печі;

$\Delta\theta = \theta_3 - \theta$ – відхилення температури;

U_0 – напруга живлення моста;

U_m – вихідна напруга моста;

U_y, U_b – напруги відповідно керування і збудження двигуна;

μ – переміщення клапана;

f – збурення.

Характеристика роботи схеми пояснюється наступним чином.

Об'єкт регулювання представляє собою термічну піч, у якій паливо, що подається, спалюється у її порожнині. В наслідок цього процесу утворюється кількість теплоти яка пропорційна масі палива.

Кількість цього палива спричиняє відповідне зростання або зменшення температури в порожнині печі.

Отримана теплота розсіюється у навколишнє середовище та йде на зміну структури та агрегатного стану технологічної суміші, що знаходиться у печі, з метою приготування відповідного виробу.

Таким виробом може бути вогнетриви, шліфувальні, автомобілі, та ін.

Усталений режим об'єкта регулювання характеризується рівністю кількості тепла, що утворюється в печі внаслідок згоряння палива, і розсіюваної у навколишнє середовище.

Вхідною величиною є витрата палива, а вихідною – температура в печі.

Електричний міст складається з резисторів R_2 , R_3 , змінного резистора R_1 і терморезистора. Термометр опору вимірює фактичну температуру в печі.

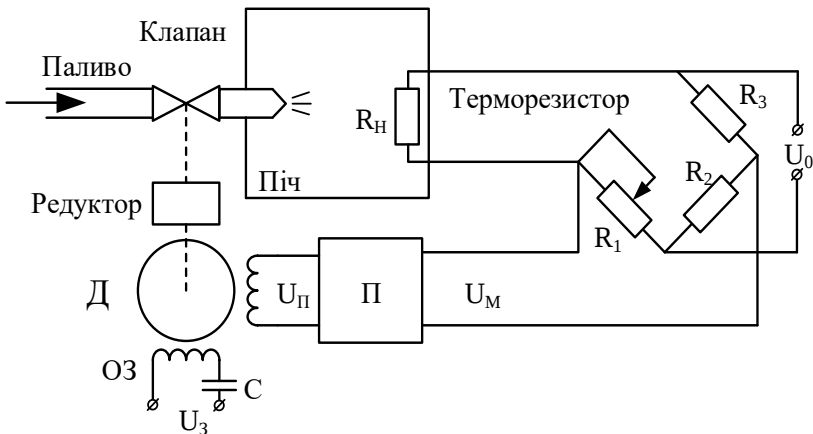


Рисунок 2.6 – Система автоматичного регулювання температурних режимів у технологічній печі

За допомогою зміни опору резистора і задають бажану температуру в печі. Вхідна величина містка – температура в печі, а вихідна – напруга розбалансу. Напруга U_p , що подається на якорь двигуна постійного струму з незалежним збудженням. Залежно від

полярності напруги U_p вал двигуна переміщуватиме клапан в одну чи іншу сторону, збільшуючи або зменшуючи подачу палива.

Вхідна величина двигуна з валом є підсилена напруга розбалансу, а вихідна – кут повороту валу. Редуктор представляє собою пристрій механічно зв'язаний з клапаном, який регулює подачу палива до об'єкту регулювання.

Редуктор передає обертовий момент з валу електричного двигуна на клапан, таким чином регулюючи витрату палива, який подаються на об'єкт регулювання.

Таблиця 2.1. Вихідні дані для схеми 2.6

Варіант	α_0 , с	K_0 , С/см	K_1 , С/см	α_m , /°С	α_y	$T_{дв}$, с	$K_{дв}$, м/(В·с)	f , м
1	.5	5.0	1.2	0.8	0	.050	0.10	.5
2	.8	4.5	1.5	0.9	5	.040	0.15	.6
3	.7	4.0	2.0	1.0	0	.030	0.20	.7
4	.6	3.5	0.5	0.5	0	.020	0.50	.8
5	.5	3.0	0.6	0.4	5	.015	0.40	.9
6	.4	2.5	0.7	0.3	2	.016	0.35	.0
7	.3	2.0	0.8	0.2	8	.017	0.30	.1
8	.2	1.5	0.3	0.2	4	.022	0.35	.5
9	.0	1.0	0.4	0.3	2	.024	0.25	.2
10	.5	0.8	0.5	0.4	0	.026	0.20	.3
11	.0	0.5	1.1	0.4	0	.028	0.15	.4
12	.5	1.5	1.2	0.6	5	.030	0.25	.3
13	.0	2.0	1.3	0.7	8	.033	0.30	.8
14	.5	2.5	1.4	0.4	5	.036	0.15	.7
15	.2	3.2	1.5	0.5	2	.038	0.20	.6
16	.0	3.8	1.6	0.6	0	.040	0.25	.0
17	.2	4.0	1.7	0.7	2	.042	0.15	.2
18	.8	4.2	1.8	0.8	5	.045	0.12	.3

19	.4	4.4	1.9	0.9	8	.050	0.15	.4
20	.5	4.5	2.0	1.0	0	.055	0.20	.5

Розглянемо рівняння яке відображає стан елементів системи.
Об'єкт регулювання

$$T_0 \frac{d\theta}{dt} + \theta = K_0 \mu - K_1 f; \quad (2.17)$$

$$\text{Міст} \quad -U_M = K_M \Delta \theta; \quad (2.18)$$

$$\text{Підсилювач} \quad -U_{\Pi} = K_{\Pi} U_M \quad (2.19)$$

$$\text{Двигун з редуктором} \quad -T_{\text{дв}} \frac{d^2 \mu}{dt^2} + \frac{d\mu}{dt} = K_{\text{дв}} U_y. \quad (2.20)$$

Час перехідного процесу САР не повинен перевищувати 0,2 с.

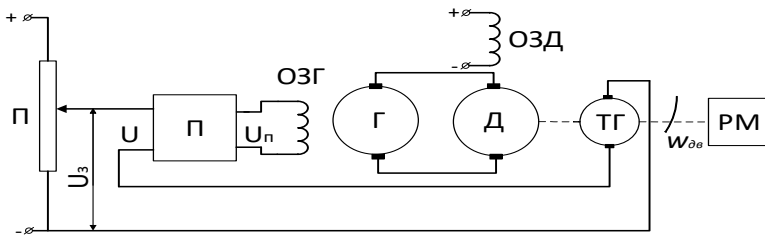


Рисунок 2.7 – Система регулювання швидкості обертання електродвигуна постійного струму

На схемі 2.7 прийнято наступні позначення:

- задаючий потенціометр;
- П – підсилювач;
- Д – двигун;
- Г – генератор;
- ТГ – тахогенератор;
- РМ – робочий механізм (навантаження);

- $\omega_{\text{дв}}$ – кутова швидкість двигуна.

Робота схеми пояснюється наступним чином.

Швидкість обертання валу двигуна постійного струму (ДПС) задається напругою U_3 , яка через опір потенціометра R_3 подається на вхід операційного підсилювача. На нього також подається напруга з тахогенератора УТГ.

При збільшенні навантаження МС зменшується швидкість обертання валу двигуна ω_D і відповідно знижується напруга тахогенератора УТГ.

Сумарна напруга УГ збільшується. Таким чином, збільшується напруга обмотки збудження генератора (ОЗГ), напруга на двигуні та кутова швидкість.

При зменшенні навантаження МС збільшується напруга тахогенератора УТГ. Сумарна напруга УГ зменшується, при цьому зменшується напруга ОЗГ і знижується кутова швидкість ДПС. САР є статичною, тому працює зі статичної похибкою, яка не повинна перевищити заданої величини.

Таблиця 4.2. Вихідні дані до схеми 2.7

Рівень	$U_{\text{ДПС}}$	$T_{\text{ДПС}}, \text{с}$	$K_{\text{Г}}$	$\omega, \text{с}^{-1}$	$K_{\text{ДВ}}, \text{В}/(\text{ХВ} \cdot \text{В})$	$v, \text{с}$	$i, \text{А}/(\text{Н} \cdot \text{м})$	$I_{\text{С}}, \text{А}$	$T, \text{В} \cdot \text{с}/\text{об}$
1	4.5	0.020	0	10	10.0	0.50	0.2	5.0	10
2	5.0	0.015	8	12	9.5	0.60	0.3	6.0	09
3	4.0	0.022	7	15	9.0	0.70	0.4	7.0	08
4	6.0	0.030	6	20	9.5	0.80	0.5	8.0	07
5	5.8	0.025	1.5	0.16	8.0	0.65	0.6	9.0	0.06
6	4.2	0.020	2.0	0.25	15.0	0.75	0.7	10.	0.05
7	3.5	0.018	2.5	0.22	14.0	0.80	0.8	1.0	0.04
8	6.0	0.014	2.1	0.30	13.0	0.75	1.2	0.9	0.05
9	6.5	0.012	2.2	0.16	12.0	0.50	1.3	0.6	0.06
10	7.0	0.017	2.3	0.20	10.0	0.80	1.5	0.7	0.07
11	4.5	0.015	1.5	0.25	12.5	0.85	0.8	2.5	0.08

12	5.0	0.011	1.5	0.22	13.5	0.60	0.7	0.5	0.09
13	10.0	0.017	1.7	0.15	14.5	0.55	0.6	0.3	0.05
14	6.0	0.025	1.8	0.12	11.0	0.50	0.5	0.4	0.08
15	10.	0.020	1.9	0.10	15.0	0.60	0.4	0.8	0.05

Рівняння елементів системи представляється в наступному вигляді
Рівняння замикання:

$$U = U_3 - U_{TG}; \quad (2.21)$$

$$-Y - T_Y \frac{dU_X}{dt} + U_Y = K_Y U; \quad (2.22)$$

$$-G - T_G \frac{dU_r}{dt} + U_r = K_G U_Y; \quad (2.23)$$

$$D - T_{дв} \frac{d\omega_{дв}}{dt} + \omega_{дв} = K_{дв} U_G - K_M M_c; \quad (2.24)$$

$$TG - U_{TG} = K_{TG} \omega_{дв}. \quad (2.25)$$

Час перехідного процесу САР не повинен перевищувати 0,1 с, що відповідає поставленій меті до дотримання точності регулювання певного процесу.

Доцільно відзначити, що особлива увага до точності дотримання технологічного процесу суттєво залежить від об'єкта та його призначення.

Так, наприклад, в авіаційній, космічній та військовій промисловості вимоги до точності керування значно більші у порівнянні з промисловими установками та побутовими пристроями. Але і вартість, складність і відповідальність таких систем значно перевищує таких, що відносяться до пристроїв загального призначення. Тому розробки спеціального призначення знаходяться поза межами знайомства в літературних джерелах. В деяких випадках такі спеціалізовані розробки представляють собою державну таємницю і обмежене використання.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лукас В.А. Теорія автоматического управления / В.А. Лукас. – М.: Недра, 1990. – 414с.
2. Иванов А.А. Теорія автоматического управления / А.А. Иванов. – М.: Недра, 1970. – 352 с.
3. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – М.: "Профессия", 2004. – 747 с.
4. Кулаковський Л. Я., Босак А. В. Теорія автоматичного керування: лінійні системи / Л. Я. Кулаковський, А. В. Босак. – Київ.: КПІ ім. Ігоря Сікорського 2019. – 34 с.
5. Власов К.П. Теория автоматического управления / К.П. Власов. – Харьков.: Изд-во "Гуманитарный центр", 2007. – 526 с.
6. Методы классической и современной теории автоматического управления : учебник в 5-и тт. Т.1: Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления / Под ред.. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ, 2004. – 656 с.
7. Попович М.Г. Теорія автоматичного керування : підручн. для студ. вищ. техн. навч. закл. / М.Г.Попович, О.В. Ковальчук.– К. : Либідь, 2007.– 656 с.
8. Гоголюк П.Ф. Теорія автоматичного керування: Підручник / П.Ф.Гоголюк, Т.М. Гречин – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2008. – 285 с.
9. Милехин Л.Н. Основы теории управления. Учебно-методическое пособие / Л.Н. Милехин. – Казань: Академия управления «ГИСБИ», 2011 – 161 с.
- 10.Босак А. В., Кулаковський Л. Я. Теорія автоматичного керування: нелінійні системи та оптимальне керування / А. В. Босак, Л. Я. Кулаковський. – Київ., КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019, – 34с.
- 11.Дьяконов В. П. MATLAB 6/6.1/6.5+Simulink 4/5 в математике и моделировании. Полное руководство пользователя / В. П. Дьяконов. М.: СОЛОН – Пресс. – 2003, §1.10, §1.12, §1.14, §3.9.
- 12.Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування / М. Г. Попович, О. В. Ковальчук. Підручник . – К. : Либідь, 1997, – 544с.

13. Куо Б. Теория и практика цифровых систем управления / Б. Куо. – М.: Машиностроение, 1986. – 448с.
14. Зіновкін В.В. Різкозмінні навантаження та їх вплив на електротехнічне обладнання і методи дослідження: Навчальний посібник. - Запоріжжя ЗНТУ 2017. - 374 с.
15. Zinovkin V. Research of electromagnetic parameters of complex electromechanical system under hardly varying loads Variable Load / V. Zinovkin, M. Antonov and I. Krysan // *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 267-272, doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160022.
16. Zinovkin v.v. research of the non-sinusoidal loads impact on the operability of tap-changers contacts / V.V.Zinovkin, O.V. Blyzniakov // *Електротехніка та електроенергетика. науковий журнал.* – Запоріжжя: НУ «ЗП», 2020. – № 2. – С