

література



Навчально-методична

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ ІМ. ІВАНА ПУЛЮЯ

*Кафедра  
Автоматизації технологічних процесів і виробництв*

**І.Р. Козбур, В.П.Пісьціо, В.Б. Савікв, П.С. Федорів**

## **АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ І ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СЛІДКУЮЧОЇ СИСТЕМИ**

**Методичні вказівки до виконання курсового проекту  
«Теорія автоматичного управління»,  
для здобувачів спеціальності  
G7 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка» освітньо-професійних програм  
«Комп'ютерно-інтегровані системи автоматики та  
робототехніки», «Комп'ютеризовані системи управління та  
прикладне програмування»**

**Тернопіль 2025**

Аналіз стійкості і якості електромеханічної слідкуючої системи. :  
Методичні вказівки до виконання курсового проекту «Теорія  
автоматичного управління», для здобувачів спеціальності 174  
«Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»  
освітньо-професійних програм «Комп'ютерно-інтегровані системи  
автоматики та робототехніки», «Комп'ютеризовані системи управління та  
прикладне програмування». / укл. І.Р. Козбур, В.П. Пісьціо, В.Б. Савків,  
П.С. Федорів. – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2025. – 67 с

Укладачі: Ігор КОЗБУР, старший викладач каф. АВ.  
Вадим Пісьціо, старший викладач каф. АВ.  
Володимир САВКІВ, канд. техн. наук, доц., зав. каф АВ.  
Петро Федорів, старший викладач каф. АВ.

Рецензент: Олександр Голотенко, канд. техн. наук, доц., зав. каф КТ.

Відповідальний  
за випуск: Ігор КОЗБУР, старший викладач каф. АВ.

Схвалено та рекомендовано до друку:

Протокол кафедри АВ №1 від 29 серпня 2025 р.

Протокол НМК факультету прикладних інформаційних технологій та  
електроінженерії №1 від 29 серпня 2025 р.

Методичні вказівки призначені для виконання курсового проекту  
«Теорія автоматичного управління», для здобувачів спеціальності 174  
«Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»  
освітньо-професійних програм «Комп'ютерно-інтегровані системи  
автоматики та робототехніки», «Комп'ютеризовані системи управління та  
прикладне програмування». Викладені матеріали визначають мету,  
завдання, структуру виконання курсового проекту та вимоги до змісту,  
обсягу, його оформлення. Визначено критерії його оцінювання і захисту.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1. Мета та завдання курсового проєкту .....	5
2. Завдання на курсову роботу .....	9
3. Рекомендована структура курсового проєкту .....	10
4. Вказівки до виконання розділів курсового проєкту .....	12
4.1 Слідкуючі системи автоматичного управління .....	12
4.2 Опис роботи схеми .....	14
4.3 Рівняння динаміки та передавальні функції функціональних елементів слідкуючої системи .....	14
4.3.1 Виконавчий двигун .....	14
4.3.2 Датчик кута розузгодження .....	18
4.3.3 Підсилювач узгодження .....	20
4.3.4 Редуктор електропроводу .....	22
4.3.5 Тахогенератор (датчик кутової швидкості) .....	24
4.4 Побудова структурної схеми слідкуючої системи .....	27
4.5 Визначення передавальних функцій системи .....	30
4.6 Амплітудно-фазова частотна характеристика (АФЧХ) .....	34
4.7 Аналіз стійкості системи .....	35
Критерій стійкості Гурвіца.....	35
Критерій стійкості Михайлова.....	37
Частотний критерій стійкості Найквіста .....	38
4.7 Знаходження перехідних характеристик системи .....	45
4.8 Вплив параметрів системи на її стійкість .....	46
5. Політика щодо академічної доброчесності .....	49
6. Оформлення пояснювальної записки і графічної частини (презентації) .....	52
7. Захист курсового проєкту та оцінювання .....	56
Рекомендована література .....	61
Додаток 1 .....	63
Додаток 2 .....	65
Додаток 3 .....	67

## ВСТУП

Дисципліна «Теорія автоматичного управління» (ТАУ) є фундаментом сучасної інженерної освіти особливо для здобувачів вищої освіти спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» освітньо-професійних програм «Комп'ютерно-інтегровані системи автоматики та робототехніки», «Комп'ютеризовані системи управління та прикладне програмування». Вона вивчає принципи побудови автоматичних систем, котрі функціонують без безпосередньої участі людини, забезпечуючи задану точність та стабільність технологічних процесів. Сьогодні алгоритми автоматичного управління працюють всюди, від побутового термостата до систем стабілізації космічних апаратів.

Курсовий проєкт є завершальним етапом вивчення ТАУ. Його мета – навчити студента не просто оперувати абстрактними математичними формулами, а використовувати їх як інструмент для проектування реальних технічних систем. Здобувачі при виконанні курсового проєкта закріплюють базу теоретичних знань та практичних навичок, що є важливим для подальшого фахівця спеціальності.

В основі будь-якої системи автоматичного управління (САУ) лежить ідея зворотного зв'язку. Саме зворотні зв'язки дозволяють системам автоматичного управління порівнювати бажаний стан із реальним і самостійно виправляти помилки та відхилення від заданих значень, що виникають під впливом зовнішніх збурень.

Під час виконання проєкту студент має пройти всі етапи класичного інженерного аналізу за допомогою інструментів і методів теорії автоматичного управління для САУ, а саме:

Математичне моделювання, перехід від фізичної схеми об'єкта до диференціальних рівнянь та передавальних функцій.

Дослідження стійкості, визначення здатності системи повертатися до стану рівноваги після зовнішнього впливу (за критеріями Гурвіца, Михайлова, Найквіста тощо).

Оцінка якості управління, аналіз перехідних процесів, визначення перерегулювання та часу встановлення сигналу.

Синтез корегувальних пристроїв, модернізація системи (наприклад, за допомогою ПД-регулятора) для досягнення необхідних показників точності та швидкодії.

Сучасний інженер має не лише «вміти рахувати», а й володіти навичками комп'ютерного моделювання. Тому методичні вказівки передбачають використання сучасного програмного забезпечення (наприклад, MathCAD, MATLAB/Simulink або VisSim і т.п.), що дозволяє візуалізувати складні динамічні процеси, за рахунок побудови відповідних графіків характеристик САУ та перевірити теоретичні розрахунки на практиці.

Виконання курсового проєкту сприятиме формуванню інженерного мислення у здобувачів, здатності бачити систему в цілому, розуміти взаємозв'язок між її елементами та прогнозувати її поведінку в критичних ситуаціях.

## 1. Мета та завдання курсового проєкту

Метою курсового проєкту з дисципліни «Теорія автоматичного управління» є систематизація, закріплення та поглиблення теоретичних знань щодо аналізу та синтезу лінійних систем автоматичного управління (САУ), а також формування практичних навичок самостійного вирішення інженерних задач у сфері автоматизації. Виконання проєкту спрямоване на досягнення наступних цілей.

Навчально-теоретична мета. Опанування методології системного підходу, розуміння САУ як сукупності взаємопов'язаних елементів, що працюють для досягнення єдиної мети управління. Виконання курсового проєкту має за мету забезпечення глибокого засвоєння фундаментальних понять, формування ґрунтовних знань про стійкість, якість регулювання, статичну та динамічну точність систем.

Практична мета. Надати здобувачам можливості практично використати теоретичні знання для математичного моделювання САУ, набутти навички практичного опису динамічних властивостей об'єктів та регуляторів за допомогою диференціальних рівнянь, операторних передавальних функцій  $W(s)$  та структурних схем. Проводити комплексний аналіз динаміки систем автоматичного управління, оволодіти методами дослідження у часовій та частотній областях (побудова перехідних характеристик, амплітудно-фазових частотних характеристик – АФЧХ). Здобувачі при виконанні курсового проєкту мають здійснити відповідну оптимізацію САУ, навчитись методам синтезу корегувальних пристроїв (зокрема ПД-регуляторів) для забезпечення заданих показників якості функціонування системи.

Інструментальна мета. Цифровізація інженерних розрахунків з використанням сучасних пакетів прикладних програм (MathCAD, VisSim, MATLAB Simulink, Scilab або Python/Control Systems Library) для

автоматизації рутинних обчислень та візуалізації результатів. При виконанні курсового проекту здобувачі повинні верифікувати отримані результати, набути вміння порівнювати результати теоретичних аналітичних розрахунків із даними комп'ютерного моделювання.

Професійно-розвиваюча мета, формування інженерного мислення. Розвиток здатності приймати обґрунтовані технічні рішення, виходячи з компромісу між швидкістю дії системи та її запасом стійкості. Виконання даного курсового проекту забезпечить якісну підготовку до майбутнього виконання кваліфікаційної роботи бакалавра. Крім цього здобувачі здобудуть відповідний досвід оформлення технічної документації (пояснювальної записки, графічного матеріалу) згідно з вимогами державних стандартів (ДСТУ/ГОСТ).

Ключовий результатом при виконанні курсового проекту є те, що здобувач вищої освіти має продемонструвати здатність самостійно пройти повний цикл розробки системи, від отримання технічного завдання до видачі рекомендацій щодо параметрів налаштування реальних промислових контролерів.

У результаті виконання курсового проекту здобувач повинен знати:

- основні принципи та концепції побудови систем автоматичного регулювання та керування;
- математичний апарат теорії автоматичного керування;
- математичні моделі типових динамічних ланок та їх характеристики;
- методи аналізу і синтезу систем автоматичного регулювання і керування.

Для виконання курсового проекту здобувач повинен вміти:

- складати математичні моделі систем автоматичного керування та регулювання;
- аналізувати стійкість та якість систем автоматичного управління;
- обґрунтовано вибирати структури та схеми автоматичного регулювання та керування, здійснювати параметричну оптимізацію регулюючих пристроїв;
- синтезувати закони та алгоритми оптимального керування технологічними об'єктами;
- застосовувати ПЕОМ та сучасне програме забезпечення для моделювання, дослідження і розрахунку систем автоматичного регулювання та керування.

Вивчення навчальної дисципліни «Теорія автоматичного управління» та курсове проектування передбачає формування та розвиток у студентів наступних компетентностей:

#### Інтегральна компетентність

Здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі та практичні проблеми, що характеризуються комплексністю та невизначеністю умов, під час професійної діяльності у галузі автоматизації та приладобудування, або у процесі навчання, що передбачає застосування теорій та методів галузі.

#### Загальні компетентності (ЗК)

ЗК01. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.

ЗК04. Навички використання інформаційних і комунікаційних технологій.

#### Фахові компетентності спеціальності (ФК)

ФК13. Здатність виконувати аналіз об'єктів автоматизації на основі знань про процеси, що в них відбуваються та застосовувати методи теорії

автоматичного керування для дослідження, аналізу та синтезу систем автоматичного керування.

ФК14. Здатність застосовувати методи системного аналізу, математичного моделювання, ідентифікації та числові методи для розроблення математичних моделей окремих елементів та систем автоматизації в цілому, для аналізу якості їх функціонування із використанням новітніх комп'ютерних технологій.

ФК19. Здатність вільно користуватись сучасними комп'ютерними та інформаційними технологіями для вирішення професійних завдань, програмувати та використовувати прикладні та спеціалізовані комп'ютерно-інтегровані середовища для вирішення задач автоматизації.

За результатами вивчення навчальної дисципліни «Теорія автоматичного управління» та виконання курсового проекту здобувач повинен продемонструвати наступні програмні результати навчання:

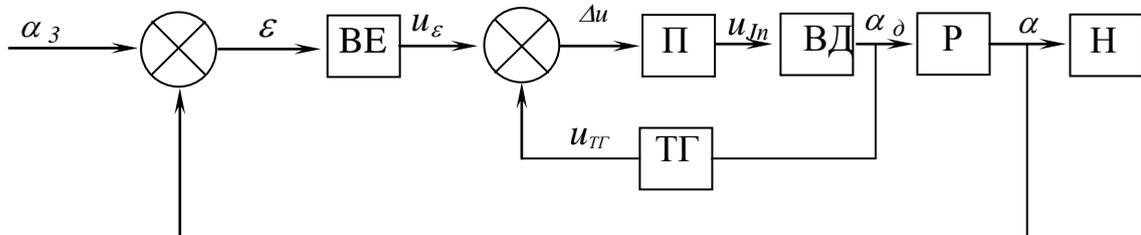
ПРН04. Розуміти суть процесів, що відбуваються в об'єктах автоматизації (за галузями діяльності) та вміти проводити аналіз об'єктів автоматизації і обґрунтовувати вибір структури, алгоритмів та схем керування ними на основі результатів дослідження їх властивостей.

ПРН05. Вміти застосовувати методи теорії автоматичного керування для дослідження, аналізу та синтезу систем автоматичного керування.

## 2. Завдання на курсову роботу

Бланк завдання курсовий проект розміщено а додатках даних методичних вказівок (Додаток 2.). Завдання на курсовий проект оформляється при його отриманні і підписується здобувачем та керівником, із зазначенням дати його видачі.

При виконанні курсового проекту з навчальної дисципліни «Теорія автоматичного управління» слід провести аналіз стійкості і якості електромеханічної слідкуючої системи, функціональна схема якої має наступний вигляд.



Функціональні елементи системи:

ВЕ – вимірний елемент;

П – підсилювач;

ВД – виконавчий двигун;

Р – редуктор;

ТГ – тахогенератор;

Н – навантаження.

$\alpha_3$  – кут повороту задаючого вала;

$\alpha$  – кут відпрацювання;

$\varepsilon$  – кут розузгодження;

$u_\varepsilon$  – напруга ВЕ;

$u_{Jn}$  – напруга на виході підсилювача;

$u_{ТГ}$  – напруга тахогенератора;

$\alpha_{\partial}$  – кут повороту вала двигуна.

Вихідні дані варіантів завдань для виконання курсового проєкту та розрахунків приведені у – в таблиці 1. (Додатки)

### 3. Рекомендована структура курсового проєкту

При виконанні курсового проєкту здобувачам необхідно виконати наступні етапи:

1. Провести опис роботи досліджуваної схеми.
2. Скласти лінеаризоване диференціальне рівняння виконавчого двигуна, визначити його передавальні функції по управляючій і збурюючій діях, визначити параметри і побудувати структурну схему приводу системи.
3. Записати лінеаризовані рівняння інших елементів системи і визначити їх передавальні функції.
4. Скласти структурну схему системи.
5. Визначити передавальні функції системи керування двигуна:
  - передавальну функцію розімкнутої системи;
  - передавальну функцію замкнутої системи відносно керованої величини за задаючою дією;
  - передавальну функцію замкнутої системи відносно керованої величини за збурюючою дією;
  - передавальну функцію замкнутої системи відносно помилки (сигналу розузгодження) за задаючою дією.
6. Визначити граничне значення коефіцієнта передавання тахогенератора  $K_{тг.гр}$ , використовуючи критерій стійкості Гурвіца.
7. Обчислити значення коефіцієнтів передавальних функцій, прийнявши коефіцієнт тахогенератора  $K_{тг} = 5 K_{тг.гр}$ .

8. Визначити ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкненої системи. Побудувати відповідні частотні характеристики розімкненої системи.
9. Визначити амплітудну, фазову, амплітудно-фазову частотні функції замкнутої системи. Побудувати відповідні частотні характеристики.
10. Визначити стійкість системи з допомогою критеріїв Гурвіца, Михайлова і Найквіста коли коефіцієнт тахогенератора дорівнює  $5 K_{ТГ,гр.}$ .
11. Визначити перехідну функцію та імпульсну перехідну функцію замкнутої системи. Побудувати графіки перехідної та імпульсної перехідної характеристики замкнутої системи і за ними визначити показники якості системи.
12. Визначити область стійкості системи в площині одного параметру - коефіцієнта підсилення підсилювача  $k_2$ .
13. Визначити коефіцієнт підсилення підсилювача, який мінімізує квадратичну інтегральну оцінку  $I_2$  при умові обов'язкової стійкості системи.
14. При отриманому у попередньому пункті коефіцієнті підсилення підсилювача визначити ЛАЧХ та ЛФЧХ замкнутої системи, перехідну функцію, побудувати графік перехідної функції.
15. Сформулювати висновки по результатам виконання курсового проекту.

## 4. Вказівки до виконання розділів курсового проєкту

### 4.1 Слідкуючі системи автоматичного управління

Слідкуюча система – це вид системи автоматичного управління (САК), головною особливістю якої є здатність вихідної величини  $y(t)$  відтворювати зміни вхідного, задаючого (керуючого) сигналу  $x(t)$ , що змінюється за заздалегідь невідомим законом.

На відміну від систем автоматичної стабілізації, де завданням є підтримка константи, слідкуюча система має працювати в умовах постійної динамічної зміни задаючого параметра.

В основі роботи слідкуючої системи лежить принцип відхилення (зворотного зв'язку). Система постійно порівнює фактичне значення вихідного параметра з вхідним завданням. Різниця між ними – помилка управління  $\varepsilon(t)$  – використовується для формування керуючого впливу, що спрямований на зведення цієї помилки до мінімуму.

Типові елементи слідкуючої системи:

- Вимірювач неузгодженості, елемент порівняння (компаратор, дискримінатор), порівнює вхідний і вихідний сигнали.
- Підсилювально-перетворювальний пристрій, посилює та узгоджує сигнал помилки в каналі керування за потужністю та рівнем.
- Виконавчий механізм (привід, двигун), безпосередньо впливає на об'єкт управління.
- Пристрій зворотного зв'язку (датчик), передає інформацію про поточний стан виходу на вхід системи.

Для моделювання слідкуючих систем використовують математичний опис. Головною характеристикою слідкуючої системи є передавальна функція за помилкою  $W_\varepsilon(s)$ , яка пов'язує вхідний сигнал із помилкою системи:

$$W_{\varepsilon}(s) = \frac{\Phi(s)}{G(s)} = \frac{1}{1+W_p(s)}$$

Де  $W_p(s)$  – передавальна функція розімкненої системи.

Режими роботи та показники якості, характерні при аналізі слідкуючих систем. При аналізі слідкуючих систем у курсовому проєкті особлива увага приділяється таким аспектам:

1. Слідкування за гармонічним сигналом: Оцінка здатності системи відпрацьовувати синусоїдальні вхідні сигнали з різною частотою (аналіз амплітудних та фазових похибок).
2. Добротність системи: Показник, що визначає здатність системи мінімізувати помилку при зміні швидкості (добротність за швидкістю) або прискоренні вхідного сигналу.
3. Динамічна точність: Визначення помилки в усталених режимах руху (швидкісна та прискорювальна помилки).

Сфери застосування слідкуючих систем. Слідкуючі системи є незамінними в сучасній техніці, ось короткий перлік галузей їх використання:

- Робототехніка, маніпулятори, що повторюють рухи оператора або задану траєкторію.
- Військова техніка, системи наведення антен, радарів та гармат.
- Верстати з ЧПК для переміщення різального інструменту за складним контуром деталі.
- Авіація та аерокосмічна галузь.
- Енергетика, системи орієнтації сонячних панелей на Сонце.

У курсовому проєкті студент повинен не лише розрахувати параметри елементів, а й довести, що обрана структура забезпечує необхідну швидкість реакції (смугу пропускання) при мінімальному значенні динамічної похибки.

## 4.2 Опис роботи схеми.

Якщо задаюча вісь слідкуючої системи повернена на кут  $\alpha_3$ , то в давачі кута розузгодження виникає напруга розузгодження  $u_{\epsilon}$ , яка надходить на вхід підсилювача. Підсилений сигнал діє на виконавчий двигун (ВД), який через редуктор буде переміщувати навантаження й регулюючий орган давача до того часу, доки напруга розузгодження не буде дорівнювати нулю. В цьому випадку кут  $\alpha$  буде дорівнювати  $\alpha_3$  з урахуванням усталеної помилки. Для покращення динамічних властивостей системи використовують тахогенератор, напруга якого пропорційна частоті обертів двигуна.

Аналіз роботи слідкуючої системи проводять за рівняннями і параметрами елементів або за передавальними функціями. Диференціальні рівняння елементів складають на основі фізичних законів.

## 4.3 Рівняння динаміки та передавальні функції функціональних елементів слідкуючої системи.

### 4.3.1 Виконавчий двигун.

Складаючи рівняння виконавчого двигуна, необхідно враховувати, що виконавчий двигун виконують так, щоб перехідні процеси в обмотці керування проходили швидше, ніж перехідні процеси, які характеризують зміну частоти обертів ротора. У зв'язку з цим диференціальне рівняння виконавчого двигуна в основному визначають на основі другого закону Н'ютона для обертового руху:

$$J_{np} \frac{d\omega_{oe}}{dt} = M_{об}(t) - M_{нп}(t), \quad M_{нп}(t) = M_H(t) / i\eta,$$

де  $J_{np}$  – момент інерції всіх обертових мас, приведений до вала двигуна,

$$J_{np} = J_{\partial\partial} + \frac{J_n}{\eta i^2};$$

- $\omega_{\partial\partial}$  – частота обертів вала двигуна (кутова частота);
- $M_{об}(t)$  – обертовий момент;
- $M_{НП}(t)$  – момент навантаження, приведений до вала двигуна;
- $J_{\partial\partial}$  – момент інерції двигуна;
- $J_n$  – момент інерції навантаження;
- $i$  – передавальне число редуктора;
- $\eta$  – к.к.д. редуктора;
- $M_H(t)$  – момент навантаження.

Обертовий момент створюється магнітним полем і в загальному вигляді аналітичний вираз для нього буде досить складним. Можна записати, що він є функцією напруги, прикладеної до обмотки керування  $u_y$ , і частоти обертів двигуна  $\omega_{\partial\partial}$ , тобто  $M_{об} = M_{об}(u_y, \omega_{\partial\partial})$ .

Експериментальним шляхом отримано залежності

$M_{об} = f_1(u_y)$  і  $M_{об} = f_2(\omega_{\partial\partial})$  при  $\omega_{\partial\partial} = const$  і  $u_y = const$  відповідно.

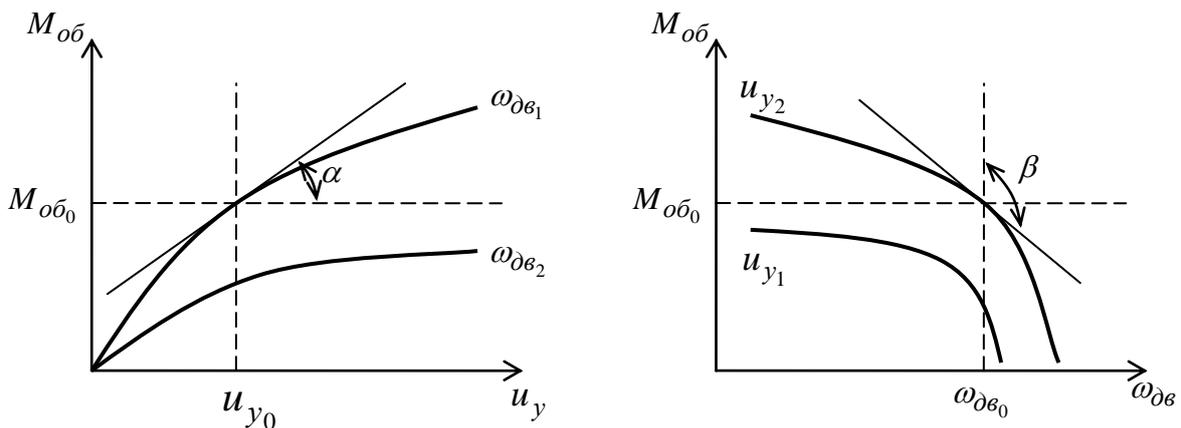


Рисунок 4.1 – Регулювальна і навантажувальна характеристики електричного двигуна.

Для усталеного режиму:

$$J_{np} \frac{d\omega_{\partial\epsilon 0}}{dt} = M_{o\bar{o}}(u_{y0}, \omega_{\partial\epsilon 0}) - M_{HP0}.$$

Під дією малих збурень змінні двигуна відхиляються від усталеного режиму на малі величини  $\Delta\omega_{\partial\epsilon}$ ,  $\Delta u_y$  і рівняння двигуна записуємо у вигляді

$$J_{np} \frac{d(\omega_{\partial\epsilon 0} + \Delta\omega_{\partial\epsilon})}{dt} = M_{o\bar{o}}(u_{y0} + \Delta u_y, \omega_{\partial\epsilon 0} + \Delta\omega_{\partial\epsilon}) - (M_{HP0} + \Delta M_{HP}).$$

Нелінійність для обертового моменту можна розкласти в ряд Тейлора і, нехтуючи членом другого і вищого порядку, можна записати

$$M_{o\bar{o}} = M_{o\bar{o}}(u_{y0}, \omega_{\partial\epsilon 0}) + \left( \frac{\partial M_{o\bar{o}}}{\partial u_y} \right)_{\substack{u_y = u_{y0} \\ \omega_{\partial\epsilon} = \omega_{\partial\epsilon 0}}} \Delta u_y + \left( \frac{\partial M_{o\bar{o}}}{\partial \omega_{\partial\epsilon}} \right)_{\substack{\omega_{\partial\epsilon} = \omega_{\partial\epsilon 0} \\ u_y = u_{y0}}} \Delta \omega_{\partial\epsilon}$$

Часткові похідні моменту визначені на рисунку як тангенси кута нахилу дотичних, проведених до відповідних кривих:

$$\left( \frac{\partial M_{o\bar{o}}}{\partial u_y} \right)_{\substack{u_y = u_{y0} \\ \omega_{\partial\epsilon} = \omega_{\partial\epsilon 0}}} = \operatorname{tg} \alpha = c_u, \quad \left( \frac{\partial M_{o\bar{o}}}{\partial \omega_{\partial\epsilon}} \right)_{\substack{\omega_{\partial\epsilon} = \omega_{\partial\epsilon 0} \\ u_y = u_{y0}}} = \operatorname{tg} \beta = -c_e \cdot c_u,$$

де  $c_e$  і  $c_u$  визначаємо через параметри двигуна.

Віднімаючи від рівняння для двигуна вираз усталеного режиму, отримуємо лінеаризоване рівняння

$$J_{np} \frac{d\Delta\omega_{\partial\epsilon}}{dt} = c_u \Delta u_y - c_u c_e \Delta \omega_{\partial\epsilon} - \Delta M_{HP}.$$

Розділивши всі члени рівняння на  $c_e \cdot c_u$ , отримаємо

$$\frac{J_{np}}{c_u c_e} \frac{d\Delta\omega_{\partial\epsilon}}{dt} + \Delta\omega_{\partial\epsilon} = \frac{1}{c_e} \Delta u_y - \frac{1}{c_u c_e} \Delta M_{HP}.$$

Введемо позначення

$$\frac{J_{np}}{c_u c_e} = T_{\partial\theta}; \quad \frac{1}{c_e} = K_{\partial\theta}; \quad \frac{1}{c_u c_e} = K_f$$

і отримаємо лінеаризоване диференціальне рівняння виконавчого двигуна

$$T_{\partial\theta} \frac{d\Delta\omega_{\partial\theta}}{dt} + \Delta\omega_{\partial\theta} = K_{\partial}\Delta u_y - K_f\Delta M_{HP}$$

Якщо вихідною величиною двигуна вважати кут повороту  $\Delta\alpha_{\partial\theta}$ , то, враховуючи, що  $\Delta\omega_{\partial\theta} = \frac{d\Delta\alpha_{\partial\theta}}{dt}$ , отримаємо

$$T_{\partial\theta} \frac{d^2\Delta\alpha_{\partial\theta}}{dt^2} + \frac{d\Delta\alpha_{\partial\theta}}{dt} = K_{\partial}\Delta u_y - K_f\Delta M_{HP}$$

Використовуючи перетворення Лапласа, отримаємо рівняння

$$(T_{\partial\theta}s+1)s\alpha_{\partial\theta} = K_{\partial}u_y(s) - K_f M_{HP}(s)$$

З цих рівнянь отримаємо передавальні функції двигуна за керуванням і збуренням у формі перетворення Лапласа:

$$W_1(s) = \frac{\alpha_{\partial\theta}(s)}{u_y(s)} = \frac{K_{\partial}}{(T_{\partial\theta}s+1)s}, \quad W_2(s) = \frac{\alpha_{\partial\theta}(s)}{M_{HP}(s)} = -\frac{K_f}{(T_{\partial\theta}s+1)s}$$

Знаючи передавальні функції, можна побудувати структурну схему двигуна, вважаючи вихідним параметром кут повороту вихідного вала.

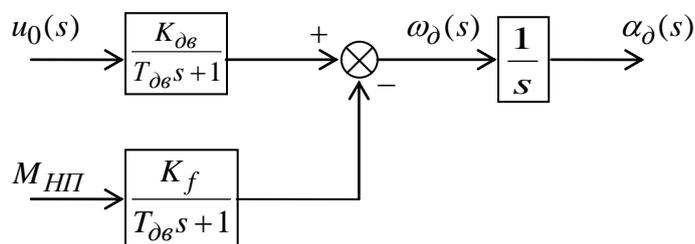


Рисунок 4.2 – Структурна схема виконуючого електродвигуна.

Рівняння та передавальні функції інших елементів системи можна представити у вигляді.

### 4.3.2 Датчик кута розузгодження

У слідкуючих системах датчик кута узгодження (або вимірювач неузгодженості) відіграє роль «органу чуття». Його завдання – порівняти вхідний кут (завдання) з вихідним кутом (положенням об'єкта) і сформуванати сигнал помилки, який система буде намагатися усунути.

Датчик кута узгодження (вимірювач помилки, розузгодження)

Датчик кута узгодження – це пристрій, призначений для отримання електричного сигналу, пропорційного різниці між заданим вхідним кутом  $\alpha_{\text{вх}}(t)$  та поточним кутом повороту вихідного вала  $\alpha_{\text{вих}}(t)$ .

Головним параметром датчика є коефіцієнт передачі (крутизна)  $K_\alpha$ , що визначає залежність вихідної напруги від величини кутового розузгодження  $\theta(t) = \alpha_{\text{вх}}(t) - \alpha_{\text{вих}}(t)$ :

$$U_{\text{вих}}(t) = K_\alpha \cdot [\alpha_{\text{вх}}(t) - \alpha_{\text{вих}}(t)] = K_\alpha \cdot \theta(t)$$

У лінійному наближенні передавальна функція датчика розглядається як безінерційна ланка, –  $W_d(s) = K_\alpha$

Типи датчиків та принципи їх роботи.

Залежно від вимог до точності та типу струму, найчастіше розглядаються такі типи:

#### **Потенціометрична схема (постійний струм).**

Складається з двох однакових кругових потенціометрів, з'єднаних за мостовою схемою.

Принцип дії, один потенціометр зв'язаний із ручкою керування (вхід), інший – із вихідним валом. Коли кути не збігаються, на діагоналі моста виникає напруга. Переваги, проста конструкція, робота на

постійному струмі. Недоліки, наявність ковзаючого контакту (шуми, зношення), обмежений кут повороту (наявність «мертвої зони»).

### **Сельсінна пара (змінний струм)**

Використовується для дистанційної передачі кута на значні відстані. Складається з сельсина-давача (СД) та сельсина-приймача (СП), що працюють в трансформаторному режимі.

Принцип роботи, зміна кута на СД змінює розподіл магнітних потоків у статорних обмотках, що наводить ЕРС у роторі СП, пропорційну синусу кута розузгодження. Переваги, висока надійність, відсутність механічного зв'язку між входом і виходом, необмежений кут обертання.

### **Оптичні енкодери (цифрові системи)**

Використовують дискретні диски з прорізами та фотоелементи. Принцип роботи, перетворюють кут безпосередньо в цифровий код (двійковий або код Грея).

Похибки та обмеження.

При розрахунках у курсовому проєкті слід враховувати.

Зона нечутливості, мінімальний кут  $\theta_{min}$ , на який датчик ще не реагує (впливає на статичну точність системи).

Нелінійність, для гармонічних датчиків (сельсинів) характеристика є лінійною лише при малих кутах ( $\sin\theta \approx \theta$ ).

Крутизна характеристики, одиниця виміру –  $[B/рад]$  або  $[B/град]$ .

Якщо використовують сельсини, слід врахувати, що напруга на виході є амплітудно-модульованою. Для подальшого підсилення в колі постійного струму після датчика обов'язково має стояти фазочутливий випрямляч (демодулятор).

Для датчика кута узгодження відповідно рівняння динаміки і передавальна функція будуть записані у вигляді:

$$u_{\alpha}(t) = k_1 \cdot \varepsilon(t), \quad W(p) = k_1,$$

де  $u_\alpha(t)$  – вихідна напруга,  $k_1$  – коефіцієнт передавання,  $\varepsilon(t)$  – кут розузгодження або помилка системи.

### 4.3.3 Підсилювач узгодження

У структурі слідкуючої системи підсилювач узгодження (або підсилювач сигналу похибки) є сполучною ланкою між малопотужним датчиком неузгодженості та потужним виконавчим пристроєм (двигуном). Його головна задача – посилити сигнал помилки до рівня, достатнього для приведення в дію механічної частини системи.

Підсилювач узгодження – це елемент САК, який здійснює підсилення сигналу розузгодження в слідкуючій системі за напругою та потужністю, а також часто виконує функції підсумовування сигналів та їх динамічної корекції.

Функціональне призначення. У слідкуючих системах підсилювач виконує наступні задачі:

- Узгодження опорів. Високий вхідний опір підсилювача запобігає «просіданню» сигналу з датчика (наприклад, потенціометра).
- Підсилення потужності. Перетворення міліватних сигналів з датчика у вати або кіловати, необхідні для роботи виконавчого двигуна.
- Фазочутливе перетворення (для систем змінного струму). Визначення знака помилки залежно від фази сигналу.
- Інтеграція корегувальних ланок. Саме в підсилювачі найпростіше реалізувати гнучкі зворотні зв'язки або ПД-алгоритми.

Математична модель підсилювача узгодження.

У більшості випадків підсилювач вважається інерційною ланкою першого порядку, оскільки електронні процеси в ньому відбуваються дуже швидко, але мають певну сталу часу через паразитні ємності або індуктивності:

$$W_{\text{підс}}(s) = \frac{K_p}{T_p \cdot s + 1}$$

Де  $K_p$  – коефіцієнт підсилення (безрозмірна величина або  $[B/B]$ );

$T_p$  – мала стала часу підсилювача (зазвичай  $T_p \approx 0.001 \dots 0.02$  с).

Якщо динаміка підсилювача значно швидша за динаміку двигуна, його часто приймають за ідеальну підсилювальну ланку:  $W(s) = K_p$ .

### Типи підсилювачів за принципом дії

Тип підсилювача	Особливості застосування
Електронні (на ОП)	Найбільш поширені. Висока точність, легкість налаштування ПІД-параметрів.
Напівпровідникові (транзисторні)	Використовуються як вихідні каскади для керування двигунами постійного струму.
Тиристорні / ШІМ-перетворювачі	Використовуються для керування потужними приводами шляхом зміни тривалості імпульсів.
Магнітні підсилювачі	Використовуються в спеціальних системах з підвищеними вимогами до надійності та радіаційної стійкості.

Розрахункові вимоги для підсилювача узгодження у курсовому проєкті. При виборі або розрахунку підсилювача студент повинен врахувати:

1. Напругу насичення, максимальна вихідна напруга підсилювача не може перевищувати напругу живлення. Це створює нелінійність типу «обмеження», яку варто враховувати при моделюванні.
2. Коефіцієнт підсилення, він має бути достатнім для подолання моменту тертя на валу двигуна при мінімальних відхиленнях (чутливість системи).

3. Дрейф нуля, або помилка на виході підсилювача при нульовому вхідному сигналі (важливо для прецизійних систем).

Неправильний вибір знака коефіцієнта підсилення  $K_p$ . У замкненій системі підсилювач має бути включений так, щоб реалізовувався від'ємний зворотний зв'язок.

Для підсилювача узгодження, відповідно рівняння динаміки і передавальна функція будуть записані у вигляді:

$$T_2 \frac{du_n}{dt} + u_n = k_2 u_n, \quad W(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1},$$

де  $T_2$  – постійна часу підсилювача,  $k_2$  – коефіцієнт підсилення;

#### 4.3.4 Редуктор електропроводу

У слідкуючих системах редуктор є механічною ланкою, що сполучає високооборотний виконавчий двигун із об'єктом управління (навантаженням), який зазвичай потребує меншої швидкості, але значно більшого моменту сили.

Механічна передача (Редуктор) – це механічний пристрій, призначений для зниження кутової швидкості та відповідного збільшення обертового моменту на вихідному валу системи. Редуктор розглядається не лише як механічний перетворювач, а й як елемент, що суттєво впливає на динаміку та точність всієї системи.

Основні характеристики редуктора. Головним параметром редуктора є передавальне число ( $i$  або  $j$ ), яке визначає співвідношення між кутами повороту (або швидкостями) вхідного та вихідного валів:

$$i = \frac{\alpha_{\text{дв}}}{\alpha_{\text{вих}}} = \frac{\omega_{\text{дв}}}{\omega_{\text{вих}}}$$

Де  $\alpha_{\text{дв}}(t)$  – кут повороту вала двигуна;  $\alpha_{\text{вих}}(t)$  – кут повороту;  $\omega_{\text{дв}}(t)$  – кутова швидкість вала двигуна;  $\omega_{\text{вих}}(t)$  – кутова швидкість вихідного вала

(навантаження), відповідно.

Математична модель редуктора у ТАУ. У структурних схемах редуктор зазвичай представляється як ідеальна пропорційна ланка (коефіцієнт передачі) за умови, що його власна інерційність врахована в загальному моменті інерції приводу:

$$W_{\text{ред}}(s) = \frac{1}{i}$$

Проте при глибокому аналізі необхідно враховувати коефіцієнт корисної дії (ККД)  $\eta$ , який впливає на передачу моменту:

$$M_{\text{вих}}(t) = M_{\text{ог}}(t) \cdot i \cdot \eta$$

Зведення моментів інерції. Для розрахунку динаміки системи всі рухомі маси (інерція двигуна, шестерень та навантаження) мають бути приведені до одного вала (зазвичай до вала двигуна). Зведений момент інерції  $J_{\text{зв}}$  обчислюється як:

$$J_{\text{зв}} = J_{\text{дв}} + \frac{J_{\text{нав}}}{i^2 \cdot \eta}$$

де  $J_{\text{нав}}$  – момент інерції об'єкта управління. Важливо зауважити, що завдяки квадрату передавального числа в знаменнику, редуктор дозволяє значно зменшити вплив інерції важкого навантаження на динаміку двигуна.

Вплив на якість управління. Редуктор вносить у систему специфічні особливості, які повинні враховуватись при моделюванні:

- Мертва зона (Люфт). Наявність зазорів у зачепленні шестерень створює зону нечутливості. У замкнених системах з високим коефіцієнтом підсилення люфт може стати причиною автоколиваний.
- Пружна деформація, при передачі великих моментів вали та зуби шестерень можуть деформуватися, що вносить додаткову інерційність (пружний зв'язок).

- Тертя, вносить нелінійність типу «сухе тертя», що впливає на статичну точність (помилку зупинки).

**Рекомендації до проектування.** При виборі передавального числа слід керуватися принципом «оптимального редуктора», який забезпечує максимальне прискорення навантаження:

$$i_{opt} = \sqrt{\frac{J_{нав}}{J_{дв}}}$$

У слідкуючих системах високої точності часто використовують спеціальні безлюфтові редуктори або системи з вибором зазорів, щоб уникнути втрати стійкості в околі положення рівноваги.

Для редуктора, відповідно рівняння динаміки і передавальна функція по куту повороту будуть записані у вигляді:

$$\alpha_o(t) = \frac{1}{\eta i} \alpha_d(t) = \frac{1}{\eta i} \int \omega_d(t) dt = k_p \int \omega_d(t) dt,$$

$$\alpha_o(t) = \frac{1}{\eta i} \frac{\omega_d(t)}{p} = \frac{k_p}{p} \omega_d(t),$$

$$W(p) = \frac{k_p}{p},$$

де  $k_p$  – коефіцієнт передавання редуктора.

### 4.3.5 Тахогенератор (датчик кутової швидкості)

У структурі слідкуючих систем тахогенератор (ТГ) виконує роль датчика кутової швидкості. Його основне призначення – створення внутрішнього зворотного зв'язку за швидкістю, що є одним із найефективніших методів покращення динамічних властивостей системи (демпфірування).

Тахогенератор – це електрична машина невеликої потужності, яка перетворює частоту обертання вала двигуна у пропорційний електричний

сигнал (напругу). У курсовому проєкті ТГ розглядається як елемент гнучкого або жорсткого зворотного зв'язку, що дозволяє стабілізувати систему та підвищити її швидкодію.

Принцип дії та основні рівняння. Робота тахогенератора базується на законі електромагнітної індукції. Вихідна напруга  $U_{ТГ}$  прямо пропорційна кутовій швидкості обертання вала  $\omega$ :

$$U_{ТГ}(t) = K_{ТГ} \cdot \omega(t) = K_{ТГ} \cdot \frac{d\alpha(t)}{dt}$$

Де відповідно:

$K_{ТГ}$  – крутизна (коефіцієнт передачі) тахогенератора, що вимірюється у [В·с/рад] або [В/(об/с)];  $\alpha$  – кут повороту вала.

Математична модель тахогенератора у ТАУ. Оскільки напруга ТГ пропорційна похідній від кута повороту, у структурних схемах тахогенератор описується як ідеальна диференційна ланка:

$$W_{ТГ}(s) = K_{ТГ} \cdot s$$

Для випадку кутової швидкості передавальна функція тахогенератора перетворюється у пропорційну ланку:

$$W_{ТГ}(s) = K_{ТГ}$$

Якщо враховувати електричну інерційність обмоток (яка зазвичай дуже мала), передавальна функція набуває вигляду реальної диференційної ланки:

$$W_{ТГ}(s) = \frac{K_{ТГ} \cdot s}{T_{ТГ} \cdot s + 1}$$

Роль тахогенератора у слідкуючій системі. Використання тахогенератора дозволяє вирішити кілька критичних завдань:

1. Демпфування коливань: Введення сигналу, пропорційного швидкості, діє аналогічно механічній в'язкості. Це дозволяє «гасити» автоколивання, які виникають при високих коефіцієнтах підсилення.

2. Підвищення стійкості: Завдяки тахометричному зворотному зв'язку можна суттєво розширити запаси стійкості системи за фазою та амплітудою.
3. Покращення якості регулювання: ТГ дозволяє зменшити перерегулювання та скоротити час перехідного процесу.

Типи тахогенераторів.

У слідкуючих системах найчастіше розглядають два типи тахогенераторів.

Тахогенератори постійного струму, котрі мають високу точність і лінійність, але мають щітковий контакт, який створює завади («пульсації»).

Асинхронні тахогенератори (змінного струму): Більш надійні, не мають щіток, але їхня характеристика лінійна лише у вузькому діапазоні швидкостей.

При використанні тахогенератора у схемі слідкуючої системи слід обов'язково враховувати наступні моменти

Узгодження знаків зворотнього зв'язку, сигнал з тахогенератора має подаватися на вхід підсилювача зі знаком «мінус» відносно основного сигналу помилки (від'ємний зворотний зв'язок).

Врахування редуктора, якщо ТГ встановлений на валу двигуна (до редуктора), він реагує на високу швидкість двигуна. Якщо на вихідному валу – на швидкість об'єкта. Це важливо при визначенні загального коефіцієнта зворотного зв'язку.

Для тахогенератора, відповідно рівняння динаміки і передавальна функція будуть записані у вигляді:

$$u_{m_2}(t) = k_{m_2} \cdot \omega_0(t), \quad W(p) = k_{m_2},$$

де  $k_{m_2}$  – коефіцієнт передавання тахогенератора.

#### 4.4 Побудова структурної схеми слідкуючої системи

Побудова структурної схеми – це етап переходу від фізичних пристроїв до математичної моделі. Це графічне відображення взаємозв'язків між елементами, де кожен блок представлений своєю передавальною функцією  $W(s)$ .

Структурна схема є основою для подальшого аналізу стійкості та якості системи. Вона складається з ланок, що відображають динаміку окремих вузлів, та ліній зв'язку, що показують напрямок передачі сигналів.

Елементи структурної схеми.

При побудові схеми слідкуючої системи використовують такі стандартні позначення.

Прямокутниками позначають динамічні ланки з передавальною функцією  $W(s)$ .

Суматор, компаратор, елемент порівняння – позначають  $\otimes$  або  $\oplus$ , це вузол, де здійснюється додавання або віднімання сигналів (наприклад, формування помилки  $\varepsilon = g - y$ ).

Точка розгалуження, місце, звідки сигнал подається на кілька ланок одночасно.

Алгоритм складання структурної схеми.

Схема будується послідовно за ходом розповсюдження сигналу:

1. Вхідний сигнал  $g(s)$  (або  $\alpha_{ex}(s)$ ): задаючий, вхідний кут повороту.
2. Перший суматор, порівнює вхідний сигнал із сигналом головного зворотного зв'язку.
3. Датчик кута повороту (Вимірювач), ланка  $K_\alpha$ , що перетворює кутову помилку в електричну напругу.
4. Другий суматор (для місцевого ЗЗ), тут від основного сигналу віднімається сигнал із тахогенератора.

5. Підсилювач, ланка  $W_{\text{підс}}(s)$ , що збільшує потужність сигналу, узгоджує канал керування по коефіцієнтам передачі.
6. Виконавчий двигун, ланка  $W_{\text{дв}}(s)$ , що перетворює напругу в кут повороту або швидкість.
7. Редуктор, ланка  $1/i$ , що зменшує кутову швидкість і передає рух на об'єкт.
8. Вихідний сигнал  $y(s)$  (або  $\alpha_{\text{вих}}(s)$ ), кінцевий результат вихідний кут повороту слідкуючої системи.

Зворотні зв'язки у слідкуючій системі (33). У типовій слідкуючій системі розрізняють:

- Головний зворотний зв'язок (жорсткий), охоплює всю систему від виходу до першого суматора. Забезпечує точність відстеження вхідного кута.
- Місцевий зворотний зв'язок (гнучкий), реалізується через тахогенератор  $W_{\text{ТГ}}(s)$ . Він охоплює тільки підсилювач та двигун, служачи для покращення демпфірування (стабілізації).

Передавальна функція замкненої системи.

Після побудови схеми необхідно визначити загальну передавальну функцію за вхідним сигналом по задаючому куту повороту  $\Phi(s)$ . Для системи з від'ємним зворотним зв'язком вона розраховується за правилом:

$$\Phi(s) = \frac{W_p(s)}{1 + W_p(s) \cdot W_{\text{зз}}(s)}$$

Для одиничного загального зворотнього зв'язку вираз передавальної функції замкнутої системи прийме вигляд:

$$\Phi(s) = \frac{W_p(s)}{1 + W_p(s)}$$

Де відповідно,  $W_p(s)$  – передавальна функція розімкненої системи, або добуток передавальних функцій усіх ланок у прямому ланцюзі;  $W_{зз}(s)$  – передавальна функція ланок у колі зворотного зв'язку.

Поради щодо оформлення структурної схеми.

На схемі обов'язково підписуйте кожен ланку (наприклад,  $W_{дв}(s)$ ,  $W_{ред}(s)$ ). Вкажіть знаки біля суматорів («+» або «-»). Для ТАУ стандартним є від'ємний зворотний зв'язок. Схема має бути читабельною: основний потік сигналу зазвичай спрямований зліва направо, а лінії зворотного зв'язку – знизу.

Структурна схема всієї слідкуючої системи по куту повороту матиме вигляд:

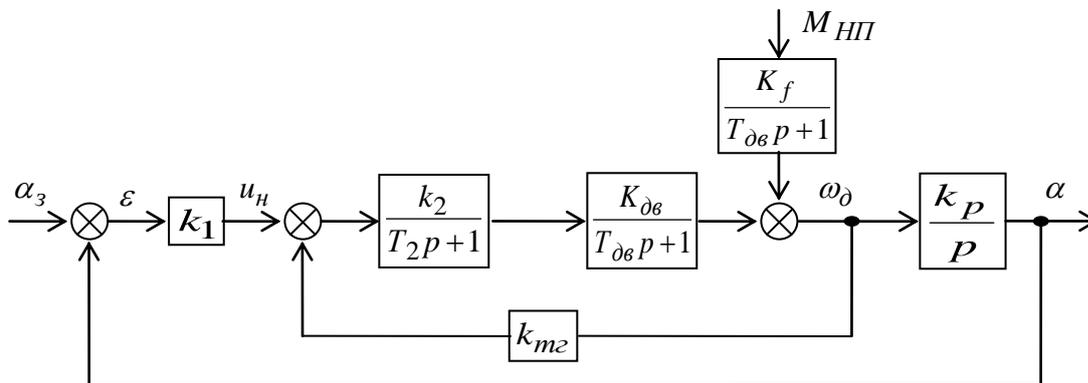


Рисунок 4.3 – Структурна схема слідкуючої системи по куту повороту

## 4.5 Визначення передавальних функцій системи

Для визначення передавальних функцій системи необхідно здійснити ряд еквівалентних перетворень, користуючись відповідними правилами для знаходження передавальних функцій типових з'єднань ланок.

### Послідовне з'єднання ланок.

Низка послідовно з'єднаних ланок перетворюється в еквівалентну ланку з передавальною функцією, що дорівнює добутку передавальних функцій окремих ланок

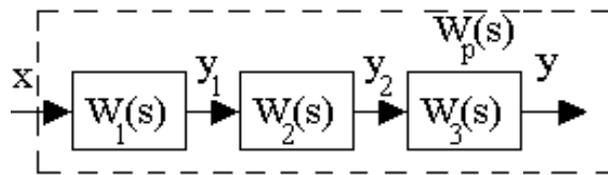


Рисунок 4.4 – Послідовне з'єднання ланок.

Вихідна величина

$$Y(s) = W_3(s) \cdot Y_2(s) = \dots = W_1(s) \cdot W_2(s) \cdot W_3(s) \cdot X(s).$$

Результуюча передавальна функція

$$W_p(s) = W_1(s)W_2(s)W_3(s), \text{ або } W_p(s) = \prod_{i=1}^n W_i(s).$$

### Паралельне з'єднання ланок.

Паралельне з'єднання ланок – таке з'єднання, при якому на вхід кожної ланки подається один і той самий сигнал, а вихідні сигнали додаються:

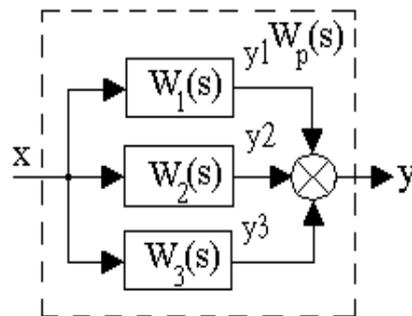


Рисунок 4.5 – Паралельне з'єднання ланок.

Вихідна величина

$$Y(s) = W_1(s)X(s) + W_2(s)X(s) + W_3(s)X(s) .$$

Результуюча передавальна функція

$$W_p(s) = W_1(s) + W_2(s) + W_3(s) \quad \text{або} \quad W_p(s) = \sum_{i=1}^n W_i(s) .$$

### З'єднання ланок зі зворотнім зв'язком.

Зворотний зв'язок – характеризується тим, що вихідний сигнал ланки подається на її вхід. Може бути додатним, якщо сигнал  $y_1$  і вхідний сигнал  $x$  додаються, або від'ємним, якщо відповідні сигнали віднімаються:

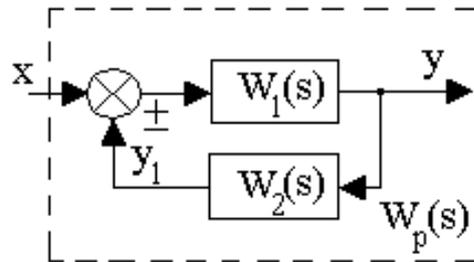


Рисунок 4.6 – З'єднання ланок зі зворотнім зв'язком.

Передавальна функція зворотного зв'язку має вигляд

$$W_p(s) = \frac{W_1(s)}{1 \pm W_2(s)W_1(s)} , \quad \text{де знак «+» відповідає від'ємному, а «-» –}$$

додатному зворотному зв'язку.

### Правила трансформації структурних схем.

#### Перенесення суматора

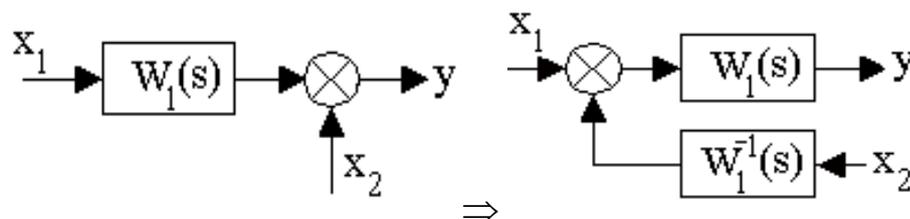


Рисунок 4.7 – Перенесення суматора.

$$y = x_1 W_1(s) + x_2$$

$$y = [x_1 + x_2 W_1^{-1}(s)] W_1(s) = x_1 W_1(s) + x_2$$

### Перенесення вузла розгалуження.

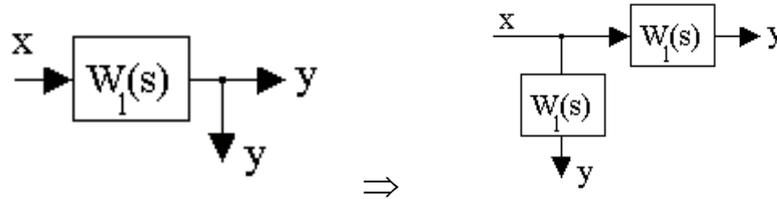


Рисунок 4.8 – Перенесення вузла розгалуження.

Знаходження передавальної функції – це центральний аналітичний етап курсового проекту. Передавальна функція  $W(s)$  (або  $W(p)$ , в подальшому комплексні оператори  $s$  та  $p$  вважатимемо тотожними  $s \equiv p = a + j \cdot \omega$ ) описує динамічні властивості системи у зображеннях по Лапласу або операторному вигляді, визначається як відношення виходу до входу при нульових початкових умовах.

Після побудови структурної схеми необхідно звести її до єдиного математичного виразу, який дозволить аналізувати стійкість та якість управління.

### Передавальна функція розімкненої системи

Передавальна функція розімкненої системи  $W_p(s)$  – це добуток усіх ланок, що входять у прямий ланцюг та коло зворотного зв'язку (якщо воно не є одиничним). Вона є критично важливою для подальшого аналізу за критеріями Найквіста або Михайлова, знаходження виразів передавальних функцій замкнутої системи, – за задаючим (вхідним) впливом, за відхиленням, за збудженням.

Для типової слідкуючої системи:

$$W_p(s) = K_\alpha \cdot W_{\text{підс}}(s) \cdot W_{\text{дв}}(s) \cdot \frac{1}{i}$$

При слідкуючому режимі роботи системи за кутом повороту у вираз передавальної функції додається ідеальна інтегруюча ланка, котра уособлює собою процес перетворення кутової швидкості у кут повороту.

$$W_{инт}(s) = \frac{\alpha(s)}{\omega(s)} = \frac{1}{s}, \text{ виходячи з рівняння динаміки } \alpha(t) = \int \omega(t) dt.$$

Тоді відповідна передавальна функція для такого випадку прийме вигляд:

$$W_p(s) = K_\alpha \cdot W_{підс}(s) \cdot W_{дв}(s) \cdot \frac{1}{i} \cdot \frac{1}{s}$$

### **Передавальна функція замкненої системи (за входом)**

Вона пов'язує вхідний сигнал (завдання)  $\alpha_{вх}(s)$  із вихідним сигналом  $\alpha_{вих}(s)$ :

$$W_\alpha(s) = \frac{W_p(s)}{1 + W_p(s)}$$

Де  $W_p(s)$  – передавальна функція розімкнутої системи, або у нашому випадку добуток передавальних функцій послідовно з'єднаних ланок від входу до виходу.

### **Знаходження передавальної функції за помилкою**

Оскільки ми розглядаємо слідкуючу систему, важливо знати, як змінюється помилка  $\varepsilon(s) = \alpha_{вх}(s) - \alpha_{вих}(s)$ . Передавальна функція за помилкою  $W_\varepsilon(s)$  визначається як:

$$W_\varepsilon(s) = \frac{1}{1 + W_p(s)}$$

Ця функція використовується для розрахунку статичних та динамічних похибок системи, подальшого аналізу стійкості і якості системи

### Врахування внутрішнього зворотного зв'язку (Тахогенератора)

Якщо ваша система має внутрішнє коло (наприклад, підсилювач та двигун охоплені тахогенератором), розрахунок проводиться у два етапи. Знаходиться еквівалентна передавальна функція внутрішнього кола  $W_{вн}(s)$ . Ця еквівалентна ланка підставляється в загальну схему, яка потім розраховується як звичайна одноконтурна система.

Приклад типової структури. Якщо система складається з датчика  $K_\alpha$ , підсилювача  $K_p$ , двигуна  $\frac{K_{дв}}{s(T \cdot s + 1)}$  та редуктора  $1/i$ , то передавальна функція розімкненої системи матиме вигляд:

$$W_p(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)}$$

Де  $K = K_\alpha \cdot K_p \cdot K_{дв} \cdot \frac{1}{i}$  – загальний коефіцієнт підсилення (добротність)

системи.

## 4.6 Амплітудно-фазова частотна характеристика (АФЧХ)

Амплітудно-фазова частотна характеристика (АФЧХ) пов'язує між собою амплітуду і фазу вихідного сигналу з частотою вхідного сигналу. Для її побудови необхідно знайти вираз для частотної передавальної функції  $W(j\omega)$ . Далі, для кожної частоти  $\omega$  (при зміні від нуля до нескінченності) на комплексній площині визначаємо точки, отримані точки з'єднуємо. АФЧХ можна будувати як в декартових координатах (U, V), так і в полярних (A,  $\varphi$ ).

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

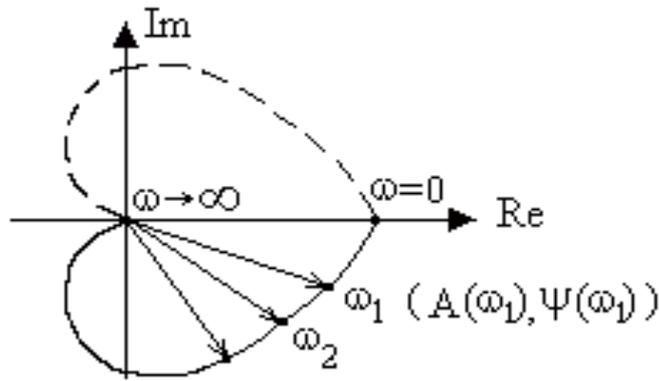


Рисунок 4.9 – Амплітудно-фазова частотна характеристика (АФЧХ)

## 4.7 Аналіз стійкості системи.

### Критерій стійкості Гурвіца

З коефіцієнтів характеристичного рівняння

$D(p)=a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n$  складаємо головний визначник Гурвіца

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & a_7 & \dots \\ a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & \dots \\ 0 & a_1 & a_3 & a_5 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & a_n \end{vmatrix}.$$

Викреслюючи в головному визначнику Гурвіца, як показано пунктиром, діагональні мінори, отримуємо визначники Гурвіца нижчого порядку:

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

Критерій стійкості Гурвіца формулюється так: для того, щоб система автоматичного керування була стійкою, необхідно і достатньо, щоб усі визначники Гурвіца мали знаки, однакові зі знаком першого коефіцієнта характеристичного рівняння  $a_0$ , тобто при  $a_0 > 0$  були додатними.

**Приклад 1.** Визначити умови стійкості системи автоматичного керування, характеристичне рівняння якої має вигляд

$$D(p) = T_1 T_2 p^3 + (T_1 + T_2) p^2 + p + k.$$

Позначимо

$$a_0 = T_1 T_2; \quad a_1 = (T_1 + T_2); \quad a_2 = 1; \quad a_3 = k.$$

Головний визначник Гурвіца

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix}.$$

Визначимо умови стійкості системи:

$$\Delta_1 = a_1, \text{ звідки } (T_1 + T_2) > 0;$$

$$\Delta_2 = a_1 \times a_2 - a_0 \times a_3, \text{ звідки } (T_1 + T_2) - k T_1 T_2 > 0;$$

$$\Delta_3 = a_1 \times a_2 \times a_3 - a_0 \times a_3^2 = a_3 (a_1 \times a_2 - a_0 \times a_3), \text{ звідки } a_3 > 0, \text{ тобто } k > 0.$$

Знаходження граничного значення коефіцієнта передавання тахогенератора зводиться до визначення такого значення вказаного параметра, при якому система автоматичного керування знаходиться на межі стійкості. Для розв'язання задачі рекомендується використати алгебраїчний критерій Гурвіца, згідно з яким система знаходиться на межі стійкості тоді, коли один або кілька визначників, отриманих із головного визначника Гурвіца, дорівнюють нулю.

**Приклад 2.** Знайти граничні значення параметра  $k$  для системи, описаної в прикладі 1.

З виразів для умов стійкості можна отримати умову знаходження системи на межі стійкості. Це є вирази

$$k = 0 \text{ і } (T_1 + T_2) - k T_1 T_2 = 0,$$

$$\text{звідки } k_{\text{граничне}} = T_1 T_2 / (T_1 + T_2).$$

## Критерій стійкості Михайлова.

Критерій стійкості Михайлова базується на дослідженні властивостей годографа характеристичного вектора (годограф Михайлова)

$$D(j\omega) = U_D(\omega) + jV_D(\omega) = D(\omega)e^{j\psi(\omega)},$$

де  $U_D(\omega)$  і  $V_D(\omega)$  – відповідно дійсна й уявна частини характеристичного вектора, а  $D(\omega)$  та  $\psi(\omega)$  – його модуль і аргумент. Згідно із критерієм для стійкості лінійної системи  $n$ -го порядку необхідно і достатньо, щоб годограф Михайлова починався на дійсній додатній півосі, огинав проти годинникової стрілки початок координат і проходив послідовно  $n$  квадрантів, де  $n$  – порядок характеристичного рівняння системи.

**Приклад 3.** Дослідимо на стійкість систему, розглянуту в попередніх прикладах, характеристичне рівняння якої має вигляд

$$D(p) = T_1 T_2 p^3 + (T_1 + T_2) p^2 + p + k.$$

Знайдемо годограф характеристичного вектора

$$D(j\omega) = T_1 T_2 (j\omega)^3 + (T_1 + T_2)(j\omega)^2 + j\omega + k,$$

звідки

$$U_D(\omega) = \operatorname{Re} D(j\omega) = X(\omega) = k - (T_1 + T_2)\omega^2;$$

$$V_D(\omega) = \operatorname{Im} D(j\omega) = Y(\omega) = \omega - T_1 T_2 \omega^3.$$

Для того, щоб система 3-го порядку була стійкою, годограф Михайлова повинен послідовно проходити 3 квадранти та охоплювати початок координат:

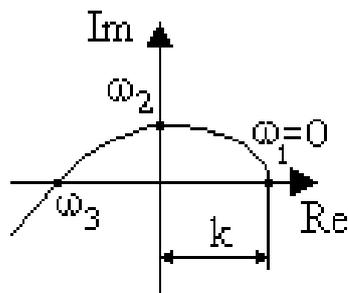


Рисунок 4.10 – Годограф Михайлова.

## Частотний критерій стійкості Найквіста

Цей частотний критерій, розроблений в 1932 р. американським вченим Найквістом, дозволяє робити висновок про стійкість замкнутої системи по вигляду АФХ розімкненої системи.

Нехай передавальна функція розімкненої системи має вигляд

$$W(s) = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_n} = \frac{B(s)}{A(s)}, \quad n \geq m.$$

Передавальна функція замкнутої САУ по каналу управління:

$$W^{\text{замк}}(s) = \frac{W(s)}{1+W(s)} = \frac{B(s)/A(s)}{1+B(s)/A(s)} = \frac{B(s)}{A(s)+B(s)}.$$

Характеристичне рівняння розімкненої системи ( $n$ -го порядку) визначено, як  $A(s)=0$ . Характеристичне рівняння замкнутої системи ( $n$ -го порядку) виражається як  $A(s)+B(s)=0$

Розглянемо вираз  $1+W(s)$

$$1+W(s) = 1 + \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{A(s)+B(s)}{A(s)} = \frac{D^{\text{замк}}(s)}{D^{\text{розом}}(s)} = H(s),$$

де  $D^{\text{замк}}(s)$ ,  $D^{\text{розом}}(s)$  – характеристичні поліноми, відповідно, замкнутої і розімкненої АСР. Підставляючи  $s=j\omega$ , отримаємо

$$W(i\omega) = \frac{b_0 (i\omega)^m + b_1 (i\omega)^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 (i\omega)^n + a_1 (i\omega)^{n-1} + \dots + a_n} = U(\omega) + iV(\omega) = M(\Omega) e^{i\phi(\omega)}$$

– АФЧХ розімкненої системи.

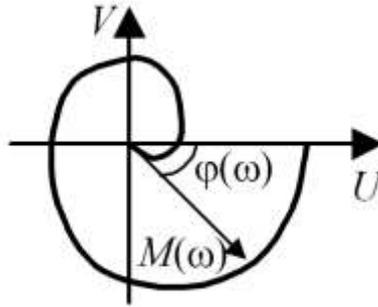


Рисунок 4.11 – АФЧХ розімкненої системи.

Вектор  $(1+W(i\omega))$ , включає властивості замкнутої і розімкненої системи, і по тому, як поводить ся  $W(i\omega)$  відносно точки  $(-1, j0)$  можна зробити висновок про стійкість замкнутої системи. Надалі розглядається АФЧХ, котра відповідає додатним частотам.

Виділимо три випадки стану рівноваги розімкненої системи: стійка, нейтральна, нестійка.

Перший випадок – система в розімкненому стані стійка. Тоді зміна аргументу характеристичного полінома розімкненої системи згідно критерію стійкості Михайлова буде рівна:

$$\Delta \text{Arg} [D^{\text{розімк}}(i\omega)] \Big|_{\omega=0}^{\omega=\infty} = n \cdot \frac{\pi}{2}.$$

Для того, щоб замкнута система була стійка, повинна виконуватися рівність:

$$\Delta \text{Arg} D^{\text{замк}}(i\omega) \Big|_{\omega=0}^{\omega=\infty} = n \frac{\pi}{2}.$$

Звідси витікає, що приріст аргументу вектора  $H(i\omega) = (1+W(i\omega))$  дорівнює нулю:

$$\Delta \text{Arg} H(i\omega) \Big|_{\omega=0}^{\omega=\infty} = \Delta \text{Arg} D^{\text{замк}}(i\omega) \Big|_{\omega=0}^{\omega=\infty} - \Delta \text{Arg} [D^{\text{розімк}}(i\omega)] \Big|_{\omega=0}^{\omega=\infty} = n \frac{\pi}{2} - n \frac{\pi}{2} = 0.$$

Дане співвідношення означає, що для стійкості замкнутої системи необхідно, щоб вектор  $W(j\omega)$ , початок якого знаходиться в точці  $(-1, j0)$ ,

а кінець, ковзаючи по АФЧХ розімкненої системи, не охоплював точку  $(-1, j0)$  при зміні  $\omega$  від 0 до  $\infty$ .

Таким чином, критерій Найквіста свідчить:

Якщо розімкнена система автоматичного управління стійка, то замкнута система автоматичного управління буде стійка, якщо амплітудно-фазова характеристика розімкненої системи не охоплює точку  $(-1, j0)$  при зміні  $\omega$  від 0 до  $\infty$ .

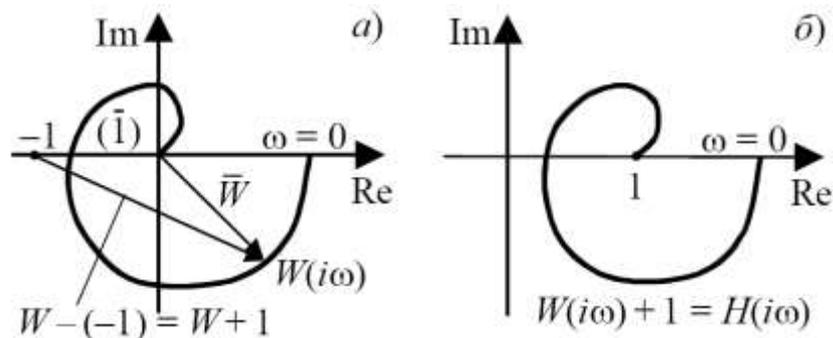


Рисунок 4.12 – АФЧХ .

а – розімкненої системи; б – функції  $H(j\omega)$

Другий випадок – система в розімкненому стані нестійка.

При розгляді багатоконтурних і одноконтурних систем регулювання, що містять нестійкі ланки, розімкнена система може виявитися нестійкою.

Хай в розімкненому стані система нестійка, при цьому характеристичне рівняння розімкненої системи має  $m$  коренів в правій напівплощині (додатні дійсні частини коренів характеристичного рівняння). Тоді згідно принципу аргументу:

$$\Delta \text{Arg} [D^{\text{розімкн}}(i\omega)] \Big|_{\omega=0}^{\omega=\infty} = (n-2m) \frac{\pi}{2}.$$

Щоб система в замкнутому стані була стійка, то повинна виконуватися рівність:

$$\Delta \text{Arg} [D^{\text{замк}}(j\omega)] \Big|_{\omega=0}^{\omega=\infty} = n \frac{\pi}{2}.$$

В цьому випадку кут повороту вектора  $H(i\omega)=1+W(i\omega)$  буде рівний

$$\Delta \text{Arg} D^{\text{разом}}(i\omega) \Big|_{\omega=0}^{\omega=\infty} = n \frac{\pi}{2} - (n-2m) \frac{\pi}{2} = \frac{m}{2} \cdot 2\pi.$$

Останнє говорить про те, що АФХ функції  $H(j\omega)$  при зміні частоти від 0 до  $\infty$  охоплює початок координат в додатному напрямі  $\frac{m}{2}$  раз.

Число обертів вектора  $H(i\omega)$  навколо початку координат рівне числу обертів вектора АФХ розімкненої системи  $H(i\omega)$  навколо точки  $(-1, j0)$ . На підставі цього витікає наступне формулювання критерію Найквіста.

Якщо розімкнена система автоматичного управління нестійка, то для того, щоб замкнута система автоматичного управління була стійка, необхідно і достатньо, щоб АФХ розімкненої системи  $H(j\omega)$  при зміні частоти від 0 до  $\infty$  охоплювала точку  $(-1, j0)$  у додатному напрямі  $\frac{m}{2}$  раз, де  $m$  – число правих (з додатною дійсною частиною) коренів характеристичного рівняння розімкненої системи.

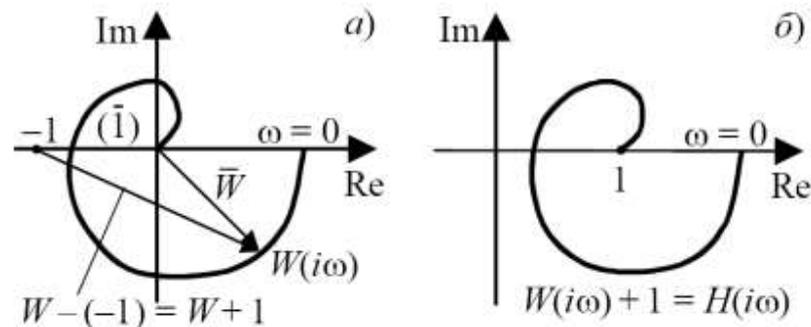


Рисунок 4.13 – АФЧХ системи .

$a - H(i\omega)$ ,  $b - W(i\omega)$  при  $m=2$

На рис. 4.13 зображені як приклад АФХ  $H(i\omega)$  і АФХ розімкненої системи, відповідні стійкій замкнутій системі, яка в розімкненому стані нестійка при  $m=2$ .

При складній формі  $H(i\omega)$  можуть виникнути ускладнення при визначенні числа її оборотів навколо точки  $(-1, j0)$ . В цьому випадку зручно застосовувати «правило переходів».

Назвемо перехід  $H(j\omega)$  через дійсну вісь при зростанні  $\omega$  є додатним, якщо він відбувається зверху вниз, і від'ємним, якщо він відбувається від низу до верху. Якщо  $H(j\omega)$  починається або закінчується на осі, то вона здійснює напівперехід. Тоді критерій Найквіста можна сформулювати таким чином.

Якщо розімкнена система автоматичного управління нестійка, то для того, щоб замкнута система автоматичного управління була стійка, необхідно і достатньо, щоб різниця між числом додатних і від'ємних переходів АФХ розімкненої системи  $H(j\omega)$  через відрізок дійсної осі  $(-\infty, -1)$  при зміні частоти від 0 до  $\infty$  була рівна  $\frac{m}{2}$ , де  $m$  – число правих коренів характеристичного рівняння.

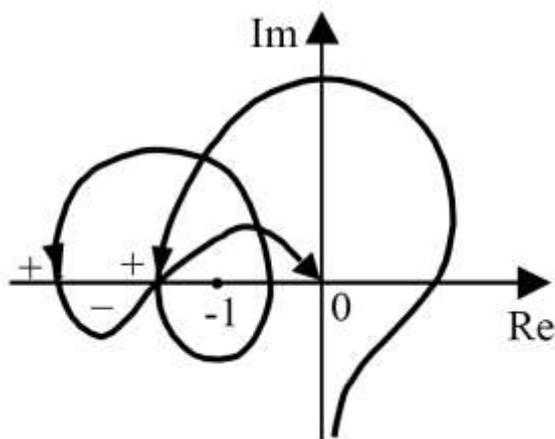


Рисунок 4.14 – АФЧХ розімкненої системи при  $m=2$ .

Як приклад на рисунку зображена АФЧХ розімкненої системи: число правих коренів  $m=2$ ; число переходів – два додатних, один від'ємний, їх різниця рівна  $1\frac{m}{2}$  отже, замкнута система стійка.

Третій випадок – система в розімкненому стані нейтральна.

В цьому випадку система повинна містити інтегруючі ланки, і тоді характеристичне рівняння розімкненої системи має корені, рівні нулю, і записується у вигляді

$$A(s) = s^v A_1(s) = 0$$

де  $v$  – порядок астатизму;  $A_1(s)$  – поліном, що не має коренів, рівних нулю.

Амплітудно-фазова характеристика розімкненої системи записується у вигляді

$$W(j\omega) = \frac{B(j\omega)}{(j\omega)^v A_1(j\omega)}.$$

При  $\omega=0$ ,  $W(j\omega)=\infty$  АФЧХ зазнає розрив, тому вирішувати питання про стійкість замкнутої системи важко, оскільки неясно, охоплює АФЧХ точку  $(-1, i0)$  чи ні.

Щоб зберегти формулювання критерію для стійких в розімкненому стані систем, при побудові годографа Найквіста при зміні частоти від  $-\infty$  до  $+\infty$  обходять початок координат по півколу нескінченно малого радіусу  $r$ . Тоді нульові корені дають такий же кут повороту, як ліві корені, тобто кожен з векторів обернеться на кут  $\pi$ .

Обходу початку координат по малій дузі  $re^{j\phi}$  відповідає передавальна функція розімкненої системи

$$W(s) = \frac{B(s)}{s^v A_1(s)} \Big|_{s=0} = \frac{B(0)}{A_1(0)} \frac{1}{(re^{j\phi})^v} = Re^{-j\psi}.$$

При  $r \rightarrow 0$ , радіус  $R \rightarrow \infty$ , а аргумент  $\psi$  міняється від  $v\frac{\pi}{2}$  до  $-v\frac{\pi}{2}$  при зміні  $\phi$  від  $\frac{\pi}{2}$  до  $-\frac{\pi}{2}$ .

Таким чином, при русі по півколу нескінченно малого радіусу в площині коренів АФЧХ розімкненої системи сама  $W(j\omega)$  може бути

представлена у вигляді вектора нескінченно великої довжини, що повертається на комплексній площині за годинниковою стрілкою на кут, рівний  $-\nu\pi$ .

При зміні  $\omega$  від 0 до  $\infty$ , тобто  $r \rightarrow 0$ ,  $0 \leq \phi \leq \frac{\pi}{2}$   $W(j\omega)$  змінюється по дузі нескінченно великого радіусу, описуючи кут від 0 до  $-\nu\frac{\pi}{2}$ . Тоді критерій Найквіста формулюється таким чином.

Система автоматичного регулювання, нейтральна в розімкненому стані, стійка в замкнутому стані, якщо АФЧХ розімкненої системи з його доповненням в нескінченності не охоплює точку  $(-1, j0)$  при зміні  $\omega$  від 0 до  $\infty$ .

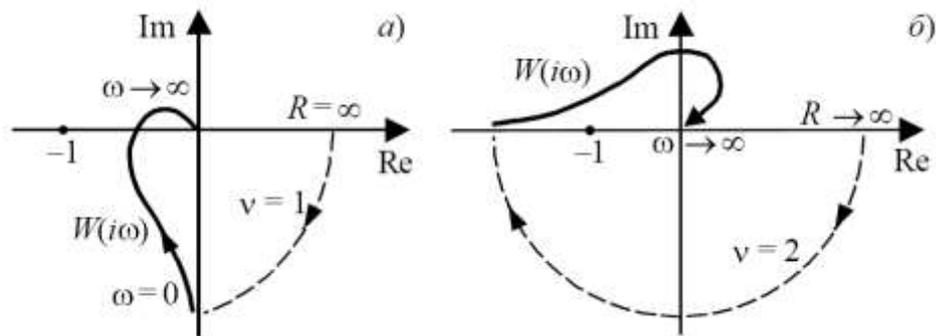


Рисунок 4.15 – АФЧХ нейтральної розімкненої системи:

*a* – з астатизмом першого порядку,  $\nu=1$ ;

*б* – з астатизмом другого порядку,  $\nu=2$

Як видно з рисунку, якщо розімкнена система має астатизм першого порядку, то замкнута система стійка, оскільки точка  $(-1, j0)$  не охоплюється, якщо ж астатизм буде другого порядку, то замкнута система нестійка – точка  $(-1, j0)$  охоплюється АФХ розімкненої системи.

Перевагами критерію Найквіста є:

- 1) застосовність при невідомих рівняннях деяких ланок розімкненої системи;
- 2) можливість дослідження стійкості систем із запізнюванням.

## 4.7 Знаходження перехідних характеристик системи

Перехідну характеристику системи будемо згідно з виразом для перехідної функції

$$h(t) = L^{-1} \left\{ \frac{W(s)}{s} \right\}, \text{ де } W(s) \text{ – передавальна функція системи у формі}$$

зображення Лапласа.

Тобто, перехідна функція є зворотним зображенням передавальної функції, поділеної на  $s$ .

Оригінал перехідної функції можна визначити як суму лишків в особливих точках.

Для випадку, коли всі корені характеристичного рівняння  $Q(s)=0$  різні,

$$h(t) = \sum_{i=1}^n \frac{R(s_i)}{Q'(s_i)} e^{s_i t},$$

коли знаменник функції  $H(s)$  має один нульовий корінь,

$$h(t) = \frac{R(0)}{Q(0)} + \sum_{i=1}^n \frac{R(s_i)}{s_i Q'(s_i)} e^{s_i t},$$

у загальному випадку

$$h(t) = \sum_{i=1}^l \frac{1}{(n_i - 1)!} \lim_{s \rightarrow s_i} \frac{d^{n_i-1}}{ds^{n_i-1}} \left[ H(s) (s - s_i)^{n_i} e^{s t} \right],$$

де  $R(s)$  – поліном чисельника  $H(s)$ ;  $Q'(s)$  – похідна від полінома знаменника  $H(s)$ ;  $s_i$  – полюси функції  $H(s)$ , тобто корені характеристичного рівняння  $Q(s)=0$ ;  $l$  – кількість різних коренів;  $n_i$  – кількість однакових коренів.

Результати обчислень перехідної функції представимо у вигляді графіка, побудованого в координатах  $(h, t)$ .

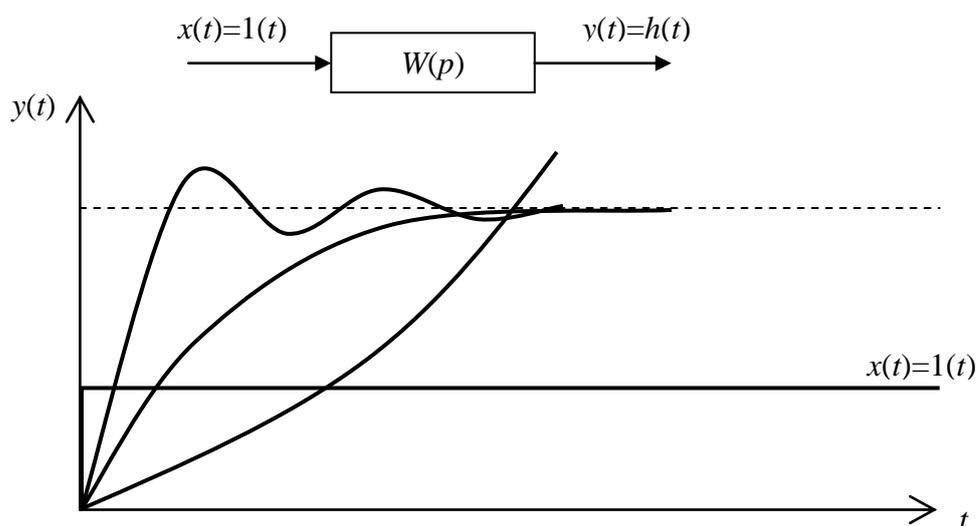


Рисунок 4.16 – Графіки перехідних процесів.

#### 4.8 Вплив параметрів системи на її стійкість

Вплив параметрів системи на її стійкість досліджуємо із допомогою методу D-розбиття.

Нехай необхідно визначити вплив на стійкість системи, наприклад, коефіцієнта підсилення  $k$ . Для цього необхідно характеристичне рівняння системи привести до вигляду

$D(p)=S(p)+kN(p)$ , де  $S(p)$  містить члени характеристичного рівняння, що не залежать від  $k$ , а  $N(p)$  – члени характеристичного рівняння, що містять  $k$  в якості множника. Тоді границю D-розбивання будемо визначати із виразу

$$D(j\omega)=S(j\omega)+kN(j\omega)=0,$$

звідки

$$k=-S(j\omega)/N(j\omega)=X(\omega)+jY(\omega).$$

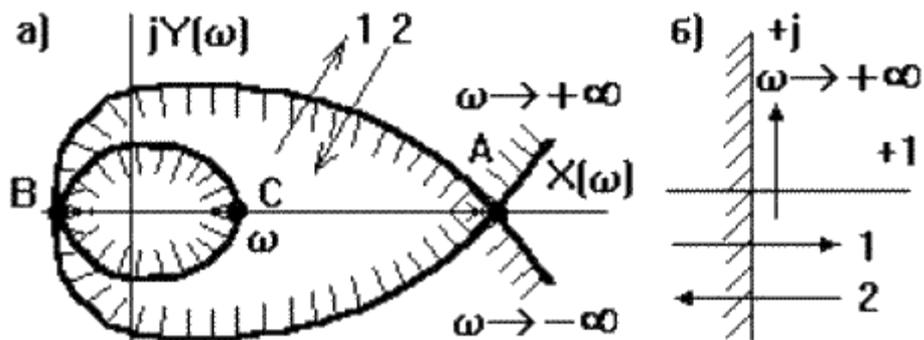


Рисунок 4.16 – Метод D-розбиття:

Змінюючи  $\omega$  від  $-\infty$  до  $+\infty$ , обчислюємо значення  $X(\omega)$  та  $Y(\omega)$  і по них будемо точки границі D-розбиття.

Зазвичай будують тільки половину кривої для  $\omega$  від 0 до  $+\infty$ , а іншу половину добудовують симетрично відносно уявної осі.

Якщо в площині коренів рухатися уздовж уявної осі від  $-\infty$  до  $+\infty$  і штрихувати її зліва (рис. а), то це буде відповідати руху вздовж лінії D-розбиття при зміні  $\omega$  від  $-\infty$  до  $+\infty$  і штрихуванню її також зліва. Переходу кореня в площині коренів із заштрихованої півплощини в нештриховану вздовж стрілки 1 відповідає аналогічний перехід через границю D-розбиття вздовж стрілки 1, і навпаки. Якщо перетинається область з подвійною штриховкою (точки А, В, С), то в площині коренів уявну вісь перетинає пара комплексно-спряжених коренів.

Претендентом на область стійкості буде та область, на границях якої штриховка напрямлена в середину. Необхідно взяти будь-яку точку з такої області і при певному значенні параметра  $k$  перевірити систему на стійкість будь-яким методом.

Особливістю є те, що як  $k$ -дійсне число, тобто  $Y(\omega)=0$ , то нас цікавить не вся область стійкості, а лише відрізок дійсної осі в цій області, тобто  $k=X(\omega)$ .

## 4.9 Квадратичні інтегральні оцінки

Квадратичні інтегральні оцінки визначаємо за формулою:

$$I_2 = \int_0^{\infty} x^2(t) dt \quad \text{або} \quad I_2 = \int_0^{\infty} \varepsilon(t)^2 dt,$$

де  $x(t)$  – відхилення керованої величини від нового усталеного значення, яке вона буде мати після закінчення перехідного процесу, а  $\varepsilon(t)$  - помилка регулювання системи.

Розроблені формули розрахунку інтеграла  $I_2$  у функції коефіцієнтів  $b_0, \dots, b_n$  і  $a_0, \dots, a_n$  – зображення по Лапласу відхилення керованої величини  $X(s)$  або помилки регулювання системи  $E(s)$ .

Якщо 
$$X(s) = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n},$$

то при  $n=1$ , 
$$I_2 = \frac{b_0^2}{2a_0 a_1},$$

$n=2$ , 
$$I_2 = \frac{(b_1^2 a_0 - b_0^2 a_2)}{2a_0 a_1 a_2},$$

$n=3$ , 
$$I_2 = \frac{b_0^2 a_3 a_2 + (b_1^2 - 2b_0 b_2) a_3 a_0 + b_2^2 a_1 a_0}{2a_0 a_3 (a_1 a_2 - a_0 a_3)},$$

$n=4$ , 
$$I_2 = \frac{b_0^2 k_1 + a_4 a_3 a_0 k_2 + a_4 a_1 a_0 k_3 + b_3^2 k_4}{2a_4 a_0 (-a_4 a_1^2 - a_3^2 a_0 + a_1 a_2 a_3)},$$

де 
$$k_1 = -a_4^2 a_1 + a_4 a_3 a_2, \quad k_2 = b_1^2 - 2b_1^2 - 2b_2 b_0,$$

$$k_3 = b_2^2 - 2b_3 b_1, \quad k_4 = -a_3 a_0^2 + a_2 a_1 a_0,$$

$n=5$ , 
$$I_2 = \frac{1}{2\Delta_5} [b_0^2 m_0 + (b_1^2 - b_2 b_0) m_1 + (b_2^2 - 2b_3 b_1 + 2b_4 b_0) m_2 + (b_3^2 - 2b_4 b_2) m_3 + b_4^2 m_4],$$

де 
$$m_0 = \frac{1}{a_0} (a_2 m_1 + a_4 m_2), \quad m_3 = \frac{1}{a_5} (a_3 m_2 + a_1 m_1),$$

$$m_1 = -a_5 a_2 + a_4 a_3, \quad m_4 = \frac{1}{a_5} (a_3 m_3 - a_1 m_2),$$

$$m_2 = -a_5 a_0 + a_4 a_1, \quad \Delta_5 = a_5 (a_4 m_4 - a_2 m_3 + a_0 m_2).$$

## **5. Політика щодо академічної доброчесності**

Даний розділ сформовано у відповідності до діючого «Положення про академічну доброчесність учасників освітнього процесу Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя» зі змінами протокол №4 від 17.04.2025 наказ №4/7-329 від 18.04.2025.

Дотримання правил академічної доброчесності є обов'язковим для усіх учасників університетської спільноти в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя, що визначає етичні принципи та правила, якими мають керуватися учасники освітнього процесу під час навчання, викладання й провадження наукової (творчої) діяльності з метою забезпечення довіри до результатів навчання та/або наукових (творчих) досягнень.

Обов'язковим є забезпечення дотримання високих професійних стандартів в усіх сферах діяльності закладу (освітній, науковій, виховній), підтримка особливих взаємовідносин між професорсько-викладацьким складом та здобувачами вищої освіти, запобігання порушенню академічної доброчесності.

Основними принципами та фундаментальними цінностями академічної доброчесності є:

- доброчесність – відданість учасників процесу реалізації державної політики у сфері якості освіти моральним принципам та стандартам, які створюють бар'єр для недоброчесності;
- чесність та порядність – системне уникнення проявів академічної недоброчесності під час реалізації власної діяльності;
- правдивість – прагнення до істини, вільне та відкрите поширення найкращих практик реалізації власної діяльності, їх безперервне надбання та збагачення;

- прозорість – доступність та відкритість інформації, яка передбачає, що всі учасники процесу реалізації державної політики у сфері якості освіти зобов'язані діяти відкрито, зрозуміло та в рамках закону;
- законність – дотримання кожним учасником процесу реалізації державної політики у сфері якості освіти законів та стимулювання до цього інших;
- повага – повага до ідей, гідності інших, їхнього фізичного та психічного здоров'я, на благо колегіальності та співпраці з іншими учасниками процесу реалізації державної політики у сфері якості освіти;
- довіра – усі учасники процесу реалізації державної політики у сфері якості освіти мають впевненість в чесності один одного, можуть покластись один на одного, позбавлені страху, що результати діяльності можуть бути несанкціоновано запозиченими, а репутацію підірвано;
- послідовне відстоювання гідної поведінки та ідей поширення принципів академічної доброчесності в несприятливих умовах стороннього тиску;
- справедливість – неупереджено однакове ставлення до усіх учасників процесу реалізації державної політики у сфері якості освіти, позбавлене дискримінації та нечесності;
- відповідальність – вміння брати на себе відповідальність за результати своєї діяльності, виконувати взяті на себе певні зобов'язання, протистояти проявам академічної недоброчесності, подавати приклади гідної поведінки;
- сумлінність – учасники процесу реалізації державної політики у сфері якості освіти належним чином використовують делеговані їм повноваження без перевищення або несумлінності виконання;

За порушення академічної доброчесності здобувачі освіти можуть бути притягнені до такої академічної відповідальності:

- повторне проходження оцінювання (контрольна робота, іспит, залік тощо);
- повторне проходження відповідного освітнього компонента освітньої програми;
- відрахування з університету;
- позбавлення академічної стипендії;
- позбавлення наданих університетом пільг з оплати навчання.

Для попередження недотримання норм та правил академічної доброчесності в університеті використовується комплекс профілактичних заходів:

- ознайомлення здобувачів освіти й педагогічних працівників та інших членів академічної спільноти із правилами академічної доброчесності;
- інформування здобувачів вищої освіти та інших членів академічної спільноти про необхідність дотримання правил академічної доброчесності, професійної етики;
- проведення ознайомлення здобувачів освіти по питаннях інформаційної діяльності університету, правильності написання наукових, навчальних робіт, правил бібліографічного опису літературних джерел та оформлення цитувань, етичного використання генеративного штучного інтелекту;
- контроль завідувача кафедри, керівників практики щодо правильного оформлення посилань на першоджерела у разі запозичень ідей, тверджень, відомостей тощо;
- перевірка пояснювальної записки курсового проєкту на предмет академічного плагіату (технічна перевірка (за допомогою спеціалізованих програмних засобів) та експертна оцінка).

## **6. Оформлення пояснювальної записки і графічної частини (презентації)**

По результатах виконання курсового проєкту студент формує пояснювальну записку та графічну частину (презентацію) і подає їх керівникові для перевірки.

Пояснювальна записка повинна містити:

- титульний аркуш (зразок наведено в додатку);
- завдання на курсовий проєкт (зразок наведено в додатку);
- зміст;
- перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів;
- вступ;
- розділи основної частини;
- висновки;
- список використаних джерел;
- додатки (за наявності).

Пояснювальна записка курсового проєкту згідно виданого індивідуального завдання (віріанту) має бути документально обґрунтована: виклад ілюструють відповідними розрахунками, кресленнями, схемами, ескізами, а також підтверджують посиланнями на чинні нормативні та/або методичні матеріали. Текст пояснювальної записки повинен бути технічно коректним і стилістично грамотним, обов'язково містити перелік використаних джерел.

Вимоги до оформлення

Папір і формат:

- основний формат – А4 (210×297 мм);
- за потреби допускається використання А3 (297×420 мм).

Друк і розміщення тексту:

- текст розміщується лише з одного боку аркуша;

- поля сторінки: ліве – не менше 25 мм, праве – не менше 10 мм, верхнє – не менше 15 мм, нижнє – не менше 20 мм.

Спосіб виконання:

- друкований (з використанням засобів виведення ЕОМ), або рукописний.

Для рукописного варіанта:

- текст пишуть охайно темним чорнилом/пастою чорного, темно-фіолетового або темно-синього кольору;
- міжрядкова відстань – 8–10 мм (орієнтовно 20–25 рядків на сторінку);
- весь текст виконується чорнилом одного кольору та відтінку; інші кольори не допускаються.

Для друкованого варіанта:

- рекомендований шрифт Times New Roman, 14 pt;
- міжрядковий інтервал – 1,5;
- не більше 40 рядків на сторінці за умови рівномірного заповнення;
- висота літер і цифр – не менше 1,8 мм.

Слова, формули або знаки, які вписуються в надрукований текст, виконують чорним кольором, а щільність вписаного тексту має бути максимально наближена до основного.

Виправлення:

- помилки виправляють шляхом наклеювання фрагмента білого паперу відповідного формату з нанесенням правильного тексту;
- кількість виправлень на сторінці повинна бути мінімальною; за наявності понад 4–5 виправлень сторінку доцільно передрукувати.

Структурування і нумерація

Текст пояснювальної зариски поділяють на розділи, підрозділи, пункти та підпункти.

- заголовки розділів розміщують по центру окремого рядка, друкують великими літерами, без крапки в кінці та без підкреслення; кожен

розділ починають з нової сторінки; перенос слів у заголовках не допускається;

- заголовки підрозділів/пунктів/підпунктів починають з абзацу, друкують малими літерами (перша – велика), без підкреслення і без крапки в кінці; допускається розміщення назви пункту/підпункту в одному рядку з текстом.
- Абзацний відступ має бути однаковим у всьому документі та становити п'ять знаків ( $\approx 1,25$  см).
- Не допускається розміщення заголовків у нижній частині сторінки, якщо після них залишається лише один рядок тексту.
- Нумерацію сторінок, розділів, підрозділів, пунктів, підпунктів, рисунків, таблиць і формул здійснюють арабськими цифрами. Нумерація сторінок – наскрізна, без крапки. Титульний аркуш включають до загальної нумерації, але номер на ньому не проставляють.

Ілюстрації (рисунки, схеми, графіки, фотографії, діаграми) розміщують одразу після першого згадування в тексті або на наступній сторінці. Нумерація – у межах розділу з зазначенням номера розділу (наприклад, Рис. 2.1). Якщо ілюстрацію перенесено на кілька сторінок, назву подають на першій, а пояснювальні дані – на кожній.

Таблиці нумерують у межах розділу (крім таблиць у додатках): номер складається з номера розділу та порядкового номера таблиці (наприклад, Таблиця 3.2). За необхідності таблицю поділяють на частини, повторюючи нумерацію граф. Цифрові дані подають з однаковою кількістю десяткових знаків; одиниці вимірювання зазначають у підзаголовках граф через кому.

Формули та рівняння розміщують по центру після тексту, де вони згадуються, із вільним рядком зверху і знизу. Нумерація – у межах розділу (наприклад, (3.1)). Пояснення символів і коефіцієнтів подають

безпосередньо під формулою у порядку їх появи.

Додатки позначають великими літерами українського алфавіту (за наявності кількох). Сторінки додатків нумерують у межах наскрізної нумерації пояснювальної записки; для нумерації елементів у додатках використовують відповідну літеру та номер.

Ілюстративні матеріали виконують чорним чорнилом/тушшю/пастою або друком. Фотографії та інші ілюстрації за потреби наклеюють на аркуші того ж формату, що й пояснювальна записка.

Посилання на використані джерела наводять у квадратних дужках, за потреби із зазначенням сторінки (наприклад, [1] або [1, с. 21]). Список використаних джерел розміщують після висновків і формують у порядку появи посилань у тексті або в алфавітному порядку. До списку включають лише ті джерела, на які є посилання.

Орієнтовний обсяг пояснювальної записки не повинен перевищувати 40 сторінок рукописного тексту (можливі відхилення з урахуванням специфіки матеріалів). Рисунки, схеми, креслення, ескізи, технологічні карти оформлюють відповідно до вимог ЄСКД та ЄСТД.

Курсовий проєкт представляється лише в зшитому вигляді. До рукопису роботи додається електронний варіант та слайди презентації, які повинні чітко, несуперечливо та повною мірою демонструвати суть виконаних робіт, прийнятих студентом технічних рішень та отримані результати.

## **7. Захист курсового проєкту та оцінювання.**

Захист курсового проєкту та оцінювання проводять у відповідності до діючого «Положення про оцінювання здобувачів вищої освіти Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя». «Положення про підсумковий семестровий контроль результатів навчання студентів Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя».

Оцінювання успішності навчання здобувачів вищої освіти – це сукупність організаційно-методичних заходів щодо перевірки та оцінювання знань, умінь і навиків здобувачів вищої освіти, набуття ними загальних та фахових компетентностей з метою раціональної організації освітнього процесу й управління якістю освітньої діяльності в університеті.

При оцінюванні успішності студентів вирішуються такі основні завдання:

- оцінювання знань, умінь, навиків та інших компетентностей, тобто результатів навчання, набутих особою при навчанні за певною освітньою програмою;
- інформування здобувачів вищої освіти та інших зацікавлених осіб про досягнуті результати при вивченні окремих дисциплін;
- мотивація осіб, що навчаються, до систематичної роботи протягом усього періоду навчання;
- аналіз результатів навчання та коригування викладачами як освітнього процесу, так і самостійної роботи здобувачів вищої освіти для підвищення якості підготовки фахівців.

В університеті оцінювання успішності навчання здобувачів вищої освіти здійснюється за 100-бальною (рейтинговою) системою (НРС). Відповідність результатів навчання оцінених за 100-бальною шкалою університету результатам за національною шкалою («відмінно», «добре»,

«задовільно», «незадовільно») та шкалою Європейської кредитної трансферно-накопичувальної системи (ЄКТС – A, B, C, D, E, FX, F).

Захист КП планується на протязі останніх двох тижнів теоретичного навчання у семестрі за графіком, затвердженим завідувачем кафедри. До захисту КП допускаються студенти, які своєчасно виконали роботу та належним чином підготували рукопис і презентацію.

На захист робота представляється лише в зшитому вигляді. До рукопису роботи додається електронний варіант та слайди презентації, які повинні чітко, несуперечливо та повною мірою демонструвати суть виконаних робіт, прийнятих студентом технічних рішень та отримані результати.

Захист проводиться публічно перед комісією у складі двох-трьох викладачів кафедри, в тому числі керівника проекту із представленням слайдів презентації та демонстрацією за допомогою комп'ютера отриманих в результаті виконання КП результатів. Захист відбувається в такій послідовності:

1. Доповідь студента про прийняті ним технічні рішення та основні отримані результати (тривалістю 5-10 хв.).
2. Відповіді студента на запитання присутніх.
3. Обговорення доповіді.
4. Відповіді на зауваження.

Форма семестрового контролю для КП – диференційований залік.

Оцінювання курсового проєкту проводиться з розрахунку 75 балів підсумкової рейтингової оцінки за виконання усіх завдань передбачених у курсовому проєктуванні та 25 балів – залікової рейтингової оцінки за захист курсового проєкту.

Оцінка вноситься до відомості обліку успішності, у балах за шкалою університету й переведена у бали за національною шкалою та шкалою Європейської кредитно-трансферної системи та залікової книжки студента

в університетській та національній шкалах.

Відповідно до Положення під час проведення захисту комісія, зокрема, оцінює:

- якість та повноту виконання обсягу КП, встановлену завданням;
- доповідь студента;
- повноту та правильність відповідей студента на поставлені членами комісії запитання.

За підсумками захисту КП оцінюється на “відмінно”, якщо задовольняються всі наступні умови:

- студент чітко, послідовно та аргументовано представив роботу;
- студент відповів аргументовано і по суті на всі запитання;
- в роботі немає суттєвих недоліків а достовірність отриманих результатів не викликає сумнівів;
- рукопис роботи оформлений відповідно до всіх вимог.

Робота оцінюється на “добре”, якщо задовольняються всі наступні умови:

- в процесі представлення роботи було дещо порушено логічність та чіткість викладу матеріалу;
- студент відповів на всі запитання, однак при цьому його відповіді не завжди були чіткими та аргументованими;
- в роботі є деякі недоліки та помилки які, однак, не спотворюють суттєвим чином отримані результати та не дозволяють поставити під сумнів їх достовірність;
- при оформленні рукопису роботи допущено деякі нечисленні помилки та опечатки.

Робота оцінюється на “задовільно”, якщо задовільняються всі наступні умови:

- в процесі представлення роботи було суттєвим чином порушено логічність та чіткість викладу матеріалу;

- студент не зміг чітко та аргументовано відповісти на переважну більшість запитань;
- в роботі є недоліки та помилки які спотворюють отримані результати, зокрема, ставлять під сумнів їх достовірність;
- при оформленні рукопису роботи допущено численні помилки та опечатки.

Якщо здобувач освіти не згоден із рішенням комісії і вважає, що мало місце порушення процедури захисту, він може подати письмову заяву декану свого факультету не пізніше наступного дня після проведення оцінювання. Декан факультету своїм рішенням формує комісію для розгляду питання дотримання процедури.

У випадку подання апеляції на процедуру захисту курсового проекту копії розпорядження декана та усі матеріали роботи комісії (пояснюючі записки, висновки комісії про порушення процедури тощо) передаються і зберігаються у особовій справі здобувача вищої освіти.

#### **VI семестр – Підсумковий семестровий контроль – курсовий проєкт.**

Курсовий проєкт «КП ТАУ»		<b>100</b>	
Захист курсового проєкту		<b>25</b>	
Виконання курсового проєкту	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	<b>25</b>	<b>75</b>
	Вступ, аналіз та розрахунок параметрів елементів системи, побудова структурної схеми, знаходження передавальних функцій розімкнутої і замкнутої системи.	<b>25</b>	
	Аналіз стійкості і якісних параметрів системи, висновки	<b>25</b>	

**Відповідність шкал оцінювання університету, національної шкали та  
шкали ЄКТС**

Оцінки за		
Шкалою університету	Національною шкалою	Шкалою ЄКТС
	Диф.залик.	
<b>90 – 100</b>	<b>Відмінно</b>	<b>A – Відмінно</b> (відмінне виконання лише з незначною кількістю помилок);
<b>82 –89</b>	<b>Добре</b>	<b>B – Дуже добре</b> (вище середнього рівня з кількома помилками);
<b>75 –81</b>		<b>C – Добре</b> (в загальному вірне виконання з певною кількістю суттєвих помилок);
<b>67 – 74</b>	<b>Задовільно</b>	<b>D – Задовільно</b> (непогано, але зі значною кількістю недоліків);
<b>60 –66</b>		<b>E – Достатньо</b> (виконання задовольняє мінімальним критеріям);
<b>35 – 59</b>	<b>Незадовільно</b>	<b>F – Незадовільно</b> (з можливістю повторного складання).
<b>1 – 34</b>		<b>FX – Незадовільно</b> (з обов'язковим проходженням повторного курсу);

## Рекомендована література

### Базова

1. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного регулювання.: Підручник, 2е видання, перероб. – К.: Либідь, 2007. – 768 с.
2. Ладанюк А.П. Теорія автоматичного керування: курс лекцій (частина перша) – К.: НУХТ, 2004 –124 с.
3. А.П. Ладанюк Теорія автоматичного керування технологічних об'єктів: Навч. посіб. / А.П. Ладанюк, К.С. Архангельська, Л.О. Власенко – К.: НУХТ, 2014. – 274 с.
4. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості: Підручник/ Ладанюк А.П.,Трегуб В.Г., Ельперін І.В., Цюцюра В.Д. – К.: Аграрна освіта, 2001 – 224 с.
5. Александров Є.Є., Голуб О.П., Костенко Ю.Т., Кузнецов Б.І., Соляник В.П. Теорія автоматичного управління. В 3-х томах. – Харків, НТУ "ХП", 2001. – 460 с.
6. Теорія автоматичного управління: Підручник/За ред. Г.Ф. Зайцева. — К.:Техніка, 2002. — 668 с.
7. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування. К.: "Либідь", 1997. - 544 с.

### Додаткова рекомендована література:

1. Самотокін Б.Б. Лекції з Теорії автоматичного керування. – Житомир: ЖІТІ, 1998. – 512 с.
2. Теорія систем керування: підручник / В.І. Корнієнко, О.Ю. Гусєв, О.В. Герасіна, В.П. Щокін; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпро: НГУ, 2017. – 497 с.
3. Артюшин, Л.М. Теорія автоматичного керування: навч. посіб. / Л.М. Артюшин, О.А. Машков, Б.В. Дурняк, М.С. Сівов – Львів: УАД, 2004. – 272 с.
4. Шаруда, В.Г. Методи аналізу і синтезу систем автоматичного

- керування: навч. посіб. / В.Г. Шаруда, В.В. Ткачов, М.П. Фількін – Д, Нац. гірнич. ун-т, 2008. – 543 с.
5. Гурко, О.Г. Аналіз і синтез систем автоматичного керування в Matlab: навч. посіб./ О.Г. Гурко, І.Ф. Єрмоєнко - Харків: ХНАДУ, 2012. - 300с.
  6. Шаруда, В.Г. Практикум з теорії автоматичного управління: навч. посіб. /В.Г. Шаруда – Д., Нац. гірнич. ун-т, 2002. – 414 с. 13.

### **Інформаційні ресурси**

1. Теорія автоматичного керування, Матеріал з Вікіпедії — вільної енциклопедії,  
[https://uk.wikipedia.org/wiki/Теорія\\_автоматичного\\_керування](https://uk.wikipedia.org/wiki/Теорія_автоматичного_керування)
2. Control engineering, From Wikipedia, the free encyclopedia,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Control\\_engineering](https://en.wikipedia.org/wiki/Control_engineering)
3. Control Control theory, From Wikipedia, the free encyclopedia,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Control\\_theory](https://en.wikipedia.org/wiki/Control_theory)
4. Методологія науки – Fajr [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [sites.google.com/site/fajrru/Home/scientific](http://sites.google.com/site/fajrru/Home/scientific).
5. Національна бібліотека України ім. В. І. Вернадського [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.nbuv.gov.ua>.
6. Харківська державна наукова бібліотека ім. Короленка [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://korolenko.kharkov.com>.
7. <https://pws.npru.ac.th/sarthong/data/files/Engineering%20With%20Mathcad.pdf> [Електронний ресурс] - Brent Maxfield. Engineering With Mathcad. Using Mathcad to Create and Organize Your Engineering Calculations
8. [https://elprivod.nmu.org.ua/files/mathapps/mds\\_matlab.pdf](https://elprivod.nmu.org.ua/files/mathapps/mds_matlab.pdf) [Електронний ресурс] - Лазарєв Ю. Ф. Моделювання динамічних систем у Matlab. Електронний навчальний посібник. – Київ: НТУУ "КПІ", 2011. – 421 с.

## Додаток 1.

Таблиця 1. – Вихідні дані варіантів завдання для проведення розрахунків  
та виконання курсового проекту.

№ варіанта	Вимірюючий елемент $k_1$ , В/р	Підсилювач		Електродвигун			Редуктор		Навантаження		Швидкість слідкування
		$K_2$	$T_2$ , с	$c_e$ , Вс /рад	$c_m$ , Вс /рад	$J_{дв}$ , кГ м <sup>2</sup>	$i$	$\eta$ ккд	$J_{нв}$ , кГ м <sup>2</sup>	$M_H$ , Нм	$\omega_0$ , рад / с
1	50	120	0.002	0.020	0.005	2x10e-5	550	0.9	0.04	0.02	0.2
2	50	140	0.003	0.020	0.005	2x10e-5	550	0.9	0.05	0.03	0.2
3	50	160	0.004	0.020	0.005	2x10e-5	550	0.9	0.06	0.04	0.2
4	50	180	0.005	0.020	0.005	2x10e-5	550	0.9	0.07	0.05	0.2
5	50	200	0.006	0.020	0.005	2x10e-5	550	0.9	0.08	0.06	0.2
6	50	220	0.007	0.020	0.005	2x10e-5	550	0.9	0.09	0.07	0.2
7	50	240	0.008	0.020	0.005	2x10e-5	550	0.9	0.10	0.08	0.2
8	50	260	0.009	0.020	0.005	2x10e-5	550	0.9	0.11	0.09	0.2
9	50	280	0.010	0.020	0.005	2x10e-5	550	0.9	0.12	0.10	0.2
10	50	300	0.011	0.020	0.005	2x10e-5	550	0.9	0.13	0.11	0.2
11	50	320	0.012	0.020	0.005	2x10e-5	550	0.9	0.14	0.12	0.2
12	50	340	0.013	0.020	0.005	2x10e-5	550	0.9	0.15	0.13	0.2
13	75	360	0.014	0.025	0.006	3x10e-5	650	0.9	0.16	0.14	0.2
14	75	380	0.015	0.025	0.006	3x10e-5	650	0.9	0.17	0.15	0.2
15	75	400	0.016	0.025	0.006	3x10e-5	650	0.9	0.18	0.16	0.2
16	75	420	0.017	0.025	0.006	3x10e-5	650	0.9	0.19	0.17	0.2
17	75	440	0.018	0.025	0.006	3x10e-5	650	0.9	0.20	0.18	0.2
18	75	460	0.019	0.025	0.006	3x10e-5	650	0.9	0.21	0.19	0.2
19	75	480	0.020	0.025	0.006	3x10e-5	650	0.9	0.22	0.20	0.2
20	75	500	0.021	0.025	0.006	3x10e-5	650	0.9	0.23	0.21	0.2
21	75	520	0.022	0.025	0.006	3x10e-5	650	0.9	0.24	0.22	0.2
22	75	540	0.023	0.025	0.006	3x10e-5	650	0.9	0.25	0.23	0.2
23	75	560	0.024	0.025	0.006	3x10e-5	650	0.9	0.26	0.24	0.2
24	75	580	0.025	0.025	0.006	3x10e-5	650	0.9	0.27	0.25	0.2

№ варіанта	Вимірюючий елемент $k_1$ , В/р	Підсилювач		Електродвигун			Редуктор		Навантаження		Швидкість слідування
		$K_2$	$T_2$ , с	$c_e$ , Вс /рад	$c_m$ , Вс /рад	$J_{дв}$ , кг м <sup>2</sup>	$i$	$\eta$ ккд	$J_H$ , кг м <sup>2</sup>	$M_H$ , Нм	$\omega_0$ , рад / с
25	75	600	0.026	0.025	0.006	3x10e-5	650	0.9	0.28	0.26	0.2
26	90	100	0.027	0.030	0.007	4x10e-5	750	0.95	0.03	0.01	0.2
27	90	120	0.028	0.030	0.007	4x10e-5	750	0.95	0.04	0.02	0.2
28	90	140	0.029	0.030	0.007	4x10e-5	750	0.95	0.05	0.03	0.2
29	90	160	0.030	0.030	0.007	4x10e-5	750	0.95	0.06	0.04	0.2
30	90	180	0.031	0.030	0.007	4x10e-5	750	0.95	0.07	0.05	0.2
31	90	200	0.032	0.030	0.007	4x10e-5	750	0.95	0.08	0.06	0.2
32	90	220	0.033	0.030	0.007	4x10e-5	750	0.95	0.09	0.07	0.2
33	90	240	0.034	0.030	0.007	4x10e-5	750	0.95	0.10	0.08	0.2
34	90	260	0.035	0.030	0.007	4x10e-5	750	0.95	0.11	0.09	0.2
35	90	280	0.036	0.030	0.007	4x10e-5	750	0.95	0.12	0.10	0.2
36	90	300	0.037	0.030	0.007	4x10e-5	750	0.95	0.13	0.11	0.2
37	90	320	0.038	0.030	0.007	4x10e-5	750	0.95	0.14	0.12	0.2
38	90	340	0.039	0.030	0.007	4x10e-5	750	0.95	0.15	0.13	0.2
39	90	360	0.040	0.035	0.008	5x10e-5	850	0.95	0.16	0.14	0.2
40	90	380	0.041	0.035	0.008	5x10e-5	850	0.95	0.17	0.15	0.2
41	90	400	0.042	0.035	0.008	5x10e-5	850	0.95	0.18	0.16	0.2
42	90	420	0.043	0.035	0.008	5x10e-5	850	0.95	0.19	0.17	0.2
43	90	440	0.044	0.035	0.008	5x10e-5	850	0.95	0.20	0.18	0.2
44	90	460	0.045	0.035	0.008	5x10e-5	850	0.95	0.21	0.19	0.2
45	90	480	0.046	0.035	0.008	5x10e-5	850	0.95	0.22	0.20	0.2
46	90	500	0.047	0.035	0.008	5x10e-5	850	0.95	0.23	0.21	0.2
47	90	520	0.048	0.035	0.008	5x10e-5	850	0.95	0.24	0.22	0.2
48	90	540	0.049	0.035	0.008	5x10e-5	850	0.95	0.25	0.23	0.2
49	90	560	0.050	0.035	0.008	5x10e-5	850	0.95	0.26	0.24	0.2
50	90	580	0.051	0.035	0.008	5x10e-5	850	0.95	0.27	0.25	0.2

## Додаток 2

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Кафедра Кафедра автоматизації технологічних процесів і виробництв

Дисципліна Теорія автоматичного керування

Спеціальність Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Курс III Група КА-31 Семестр IV

### ЗАВДАННЯ на курсовий проєкт

Студентові Петренко Петро Петрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи

Аналіз стійкості і якості електромеханічної слідкуючої системи

2. Термін здачі студентом закінченої роботи «    » 20 р.

3. Вихідні дані до роботи

№ вар.	$k_1$ , В/р	Підсилювач		Електродвигун			Редуктор		Навантаження		Швидкість слідкування
		$k_2$	$T_2$ , с	$c_e$ , Вс/рад	$c_m$ , Вс/рад	$J_{дв}$ , кг·м <sup>2</sup>	$i$	ККД	$J_H$ , кг·м <sup>2</sup>	$M_H$ , Н·м	$\omega$ рад/с
1	60	260	0,0095	0,028	0,0053	$2,1 \cdot 10^{-5}$	540	0,92	0,111	0,097	0.2

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які підлягають розробці)

Провести аналіз стійкості і якості електромеханічної слідкуючої системи.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу, якщо передбачено

Структурна схема досліджуваної системи; годограф Михайлова системи;

ЛАЧХ та ЛФЧХ системи; перехідна функція системи;

область стійкості системи у площині параметра  $k_2$  чи у площині двох параметрів  $k_2$  та  $T_2$ ;

6. Дата видачі завдання «    » 20 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів курсової роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
	<i>Описати роботу досліджуваної схеми.</i>		
	<i>Скласти лінеаризоване диференціальне рівняння виконавчого двигуна, визначити його передавальні функції по управляючій і збудуючій діях, визначити параметри і побудувати структурну схему.</i>		
	<i>Записати лінеаризовані рівняння інших елементів системи і визначити їх передавальні функції.</i>		
	<i>Скласти структурну схему системи.</i>		
	<i>Визначити передавальні функції системи керування двигуна:</i>		
	<i>Визначити граничне значення коефіцієнта передавання тахогенератора <math>K_{тг.гр}</math>, використовуючи критерій стійкості Гурвіца.</i>		
	<i>Обчислити значення коефіцієнтів передавальних функцій, прийнявши коефіцієнт тахогенератора <math>K_{тг} = 5 K_{тг.гр}</math>.</i>		
	<i>Визначити АФЧХ, ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкненої системи. Побудувати відповідні частотні характеристики розімкненої системи.</i>		
	<i>Визначити амплітудну, фазову, амплітудно-фазову частотні функції замкнутої системи. Побудувати відповідні частотні характеристики.</i>		
	<i>Визначити стійкість системи з допомогою критеріїв Гурвіца, Михайлова і Найквіста коли коефіцієнт тахогенератора дорівнює <math>5K_{тг.гр}</math>.</i>		
	<i>Визначити перехідну функцію та імпульсну перехідну функцію замкнутої системи. Побудувати графіки перехідної та імпульсної перехідної характеристики замкнутої системи і за ними визначити показники якості системи.</i>		
	<i>Визначити область стійкості системи в площині одного параметру (коефіцієнта підсилення підсилювача <math>k</math>).</i>		
	<i>Визначити коефіцієнт підсилення підсилювача, який мінімізує квадратичну інтегральну оцінку <math>I_2</math> при умові обов'язкової стійкості системи.</i>		
	<i>При отриманому у попередньому пункті коефіцієнті підсилення підсилювача визначити передавальну функцію, ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкненої системи, перехідну функцію замкнутої системи, побудувати графік перехідної функції.</i>		
	<b>Захист курсової роботи</b>		

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

*Петренко Петро Петрович*

\_\_\_\_\_ (прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

*ст. викл. каф АВ Козбур Ігор Романович*

\_\_\_\_\_ (вчений ступінь, посада, прізвище, ім'я, по батькові)

## Додаток 3

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

(повне найменування вищого навчального закладу)

*Кафедра автоматизації технологічних процесів і виробництва*

(повна назва кафедри)

# ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА ДО КУРСОВОГО ПРОЕКТУ (РОБОТА)

з дисципліни

*Теорія автоматичного керування*

(назва дисципліни)

на тему:

*Аналіз стійкості і якості електромеханічної слідкуючої системи*

Студента (ки) III курсу, групи КАс-31  
спеціальності 151 Автоматизація  
та комп'ютерно-інтегровані технології  
ступінь бакалавр

***Петренко П.П.***

(прізвище та ініціали)

Керівник: ст. викл. кафедри АВ

Козбур І Р.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Оцінка за національною шкалою \_\_\_\_\_

Кількість балів: \_\_\_\_\_ Оцінка ECTS \_\_\_\_\_

Члени комісії:

\_\_\_\_\_

(підпис)

\_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_

(підпис)

\_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_

(підпис)

\_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

м. Тернопіль – 2025