

Міністерство освіти і науки України

Житомирський державний технологічний університет

С.С. Свістельник  
А.Г. Тютюнник  
М.В. Богдановський

# **НАВЧАЛЬНА ПРОГРАМА ТА МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

**ДЛЯ ВИКОНАННЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ З  
КУРСУ**

**“ТЕОРІЯ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ”**

**ДЛЯ СТУДЕНТІВ ДЕННОЇ ТА ЗАОЧНОЇ ФОРМИ  
НАВЧАННЯ ЗА НАПРЯМАМИ ПІДГОТОВКИ**

6.092501 “Автоматизоване управління технологічними процесами”  
6.091401 “Системна інженерія”

Житомир  
ЖДТУ 2010

Міністерство освіти і науки України  
Житомирський державний технологічний університет

Затверджено на засіданні кафедри  
Автоматизації і комп'ютеризованих технологій  
(протокол № \_\_\_ від \_\_\_\_\_р.)

С.С. Свістельник, А.Г. Тютюнник, М.В. Богдановський

НАВЧАЛЬНА ПРОГРАМА  
ТА  
МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
для виконання самостійної роботи з курсу

“Теорія автоматичного керування”

Для студентів денної та заочної форми навчання за напрямками підготовки

6.092501 “Автоматизоване управління технологічними процесами ”  
6.091401 “Системна інженерія ”

Житомир  
ЖДТУ 2010

Навчальна програма та методичні вказівки для виконання самостійної роботи з курсу “Теорія автоматичного керування” для студентів денної та заочної форми навчання за напрямками підготовки 6.092501 “Автоматизоване управління технологічними процесами” та 6.091401 “Системна інженерія”

Укладачі С.С. Свістельник, А.Г. Тютюнник, М.В. Богдановський. – Житомир: ЖДТУ, 2010.– с.31

Навчальне видання

Навчальна програма та методичні вказівки для виконання самостійної роботи з курсу “Теорія автоматичного керування” для студентів денної та заочної форми навчання за напрямками підготовки 6.092501 “Автоматизоване управління технологічними процесами” та 6.091401 “Системна інженерія”

В даних методичних вказівках наведені основні положення та аспекти для самостійного вивчення основних розділів курсу «Теорія автоматичного керування»

Укладачі: Свістельник Сергій Сергійович, старший викладач  
Тютюнник Анатолій Гнатович, к.т.н., доцент  
Богдановський Мартін Віталійович, асистент

Рецензент: Каргополова Н.П.

Теорія автоматичного керування (ТАК) – базова профільююча дисципліна навчального плану спеціальності 092501 "Автоматизоване управління технологічними процесами". Мета викладання курсу ТАК – підготовка висококваліфікованих фахівців, які глибоко володіють основами ТАК і вміють виконувати дослідницькі та розрахункові роботи зі створення і впровадження в експлуатацію автоматичних систем з широким використанням засобів сучасної обчислювальної техніки.

## ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Як спрямування у техніці, теорія автоматичного керування почала складатися наприкінці позаминулого століття у зв'язку зі створенням парових, а також інших машин і механізмів епохи першої промислової революції в Європі. Роботи Дж. Максвелла, І.А. Вішнеградського і А. Стодоли, присвячені проблемам регулювання швидкості ходу парових машин і гідравлічних турбін поклали початок першій фазі так званого класичного періоду формування і розвитку теорії автоматичного керування.

Працею багатьох відомих вчених, на початку ХХ в. теорія автоматичного керування постала як цілком сформована технічна наука. В цій науці виникло і затвердилося найважливіше поняття – поняття системи автоматичного керування (САК), що складається з взаємодіючих між собою об'єкта керування та регулятора. Найпростіші диференціальні рівняння і алгебраїчні методи аналізу стійкості стали на перших порах основними засобами дослідження САУ. Розвиток техніки, зростання складності об'єктів керування до середини 30-х рр. ХХ ст. викликало необхідність в нових, більш ефективних методах дослідження. Такими методами стають частотні методи досліджень стійкості, а згодом і якості процесів регулювання та керування в лінійних системах.

Разом з тим зростає значення врахування нелінійних ефектів при розробці САУ, що змушує дослідників шукати нові шляхи і звертатися до математичних теорій і методів. Праці О. М. Ляпунова по загальній теорії стійкості мають вирішальний вплив на подальший розвиток теорії нелінійних систем. У 40-х і 50-х роках ХХ ст. поширюються і затверджуються як ефективні засоби досліджень автоматичних систем методи теорії нелінійних коливань, а також методи, основані на теорії ймовірностей і випадкових процесів.

На цьому фундаменті працями багатьох видатних вітчизняних та зарубіжних вчених формуються нові напрямки. Виникають і швидко

розвиваються методи синтезу систем, теорія релейних, імпульсних і дискретних систем, теорія інваріантності та інші теорії, що відповідають вимогам розвитку техніки та виробництва.

В даний час висока ступінь складності об'єктів керування, багатомірність, невизначеність умов функціонування, зростаючі вимоги до якості управління та інші особливості управління новою технікою породжують нові ідеї, нові принципи управління, що вимагають розробки нових теорій і методів.

Методи та теорії оптимального, стохастичного та адаптивного керування, простору стану, фільтрації, оцінювання та ідентифікації широко поширюються в дослідженнях і проектуванні систем управління. Вирішальне значення в розробках і реалізації нових систем управління набуває обчислювальна техніка.

Особливо важливе значення мають методи інтегрування лінійних диференціальних рівнянь з постійними коефіцієнтами, спектральні та операційні методи, аналіз перехідних процесів в електричних ланцюгах і їх частотні характеристики (з використанням перетворень Лапласа та Фур'є). Тому перед вивченням тем курсу необхідно повторювати відповідні розділи курсів математики та теоретичних основ електротехніки.

Всі теми в курсі однаково важливі і настільки пов'язані між собою, що вивчення кожної наступної теми можливо лише після глибокого засвоєння основних положень попередніх тем. Це безпосередньо впливає зі специфічних особливостей предмета теорії керування. Важливо врахувати, що при вивченні процесів керування динамічними об'єктами потрібно оволодіти навичками досить швидкого і багаторазового переходу від абстрактної моделі до конкретної системи і, навпаки, вміти математично формулювати технічні завдання, що розглядаються в курсі, і технічно правильно оцінювати результати математичного дослідження абстрактних моделей систем управління.

Глибоке вивчення всіх питань, передбачених програмою, можливо тільки тоді, коли опрацювання рекомендованих підручників та навчальних посібників супроводжується самостійним вирішенням відповідних завдань, які розглядаються в цих підручниках або в спеціальних збірниках задач з теорії автоматичного керування. При вивченні курсу рекомендується самостійно конспектувати відповідний матеріал в послідовності, що обумовлено програмою.

Опрацювавши тему, слід відповісти на запитання для самоперевірки, наведені в даних методичних вказівках до кожної теми програми. Мета цих запитань – звернути увагу студентів на найбільш важливий і складний матеріал курсу.

## **МЕТА ВИКЛАДАННЯ ДИСЦИПЛІНИ**

Курс теорія автоматичного керування має за мету ознайомлення студента з загальними принципами побудови систем автоматизованого керування, процесами та методами дослідження процесів в цих системах. Принципи побудови та дослідження систем керування в даному курсі вивчаються на основі розгляду принципів керування різними технічними пристроями. Ці принципи мають більш широке загальне значення і можуть бути застосовані для вивчення процесів керування в інших системах, наприклад, в біологічних, економічних, суспільних тощо.

## **ЗАДАЧІ ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ**

В результаті вивчення даного курсу студент повинен:

- знати сучасні методи теорії автоматичного керування;
- вміти користуватись цими методами для аналізу та синтезу систем автоматичного керування;
- вміти використовувати класичний математичний апарат та його нові напрямки в розвитку методів теорії автоматичного керування;
- вміти використовувати нові досягнення в розвитку обчислювальної техніки для вдосконалення методів теорії автоматичного керування;

## **ОСОБЛИВОСТІ ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ**

Дисципліна «Теорія автоматичного керування» високо математизованою. Її вивчення базується:

- на теорії диференційних рівнянь, теорії матриць, теорії ймовірностей та інших розділах вищої математики;
- на знаннях загальнотехнічних та спеціальних дисциплін таких як «Теорія електричних та магнітних кіл», «Елементи і пристрої автоматики та систем управління» тощо.

Успішне засвоєння розділів курсу можливе лише при регулярній самостійній роботі з літературою і творчого відношення до виконання завдань на практичних заняттях та лабораторних роботах.

## ЗМІСТ ДИСЦИПЛІНИ

### Передмова

Призначення курсу «Теорія автоматичного керування» та його зв'язку з іншими дисциплінами спеціальності. Основні етапи розвитку техніки і теорії автоматичного регулювання та керування. Роль вітчизняних вчених у розвитку теорії автоматичного керування. Значення теорії автоматичного керування при розв'язанні задач автоматизації виробничих та технологічних процесів. Значення впровадження автоматики в народне господарство.

### Загальна характеристика понять теорії автоматичного керування

**Основні поняття та визначення.** Задачі автоматизації об'єктів. Вхідні та вихідні змінні. Зворотній зв'язок та його призначення. Поняття про автоматичне регулювання та керування. Змінні, які керуються та регулюються. Поняття про керуючі дії та збурення. Типові сигнали зовнішніх впливів в автоматичних системах.

Типові об'єкти автоматизації, їх характеристики та рівняння основних режимів роботи. Криві розгону об'єктів. Імпульсні перехідні характеристики об'єктів. Передатні та частотні функції об'єктів. Стійкі, нестійкі та нейтральні об'єкти керування. Об'єкти з розподіленими параметрами та з запізнюванням. Ідентифікація об'єктів. Виробничі та технологічні процеси як складні об'єкти автоматизації. Функціональні та структурні схеми об'єктів. Системний підхід до розв'язання задач автоматизації технологічних процесів.

**Принцип побудови автоматичних систем.** Принципи регулювання за відхиленням вихідної змінної, за збуренням та комбіноване регулювання. Керуючий автоматичний пристрій та регулятор. Визначення автоматичної системи. Функціональні схеми систем та класифікація основних елементів автоматичних систем за їх призначенням.

Мета керування. Показники мети керування та їх аналітичне формулювання. Поняття про алгоритм керування.

Принцип класифікації автоматичних систем. Класифікація систем за законом зміни вихідного впливу на об'єкту. Системи автоматичної стабілізації, систем програмного керування та слідкуючи системи. Приклади автоматичних систем та їх функціональні системи. Системи з змінними параметрами (нестационарні системи). Детерміновані та стохастичні системи. Оптимальні та адаптивні системи. Одномірні та

багатомірні системи. Основні режими роботи автоматичних систем і задачі їх дослідження.

**Задачі теорії автоматичного керування.** Статика автоматичних систем. Статичний режим роботи автоматичної системи. Поняття про статичні характеристики систем. Коефіцієнт підсилення. Статичне та астатичне регулювання і керування. Статична похибка. Математичні моделі статички одномірних та багатомірних систем.

Загальні поняття про динаміку автоматичних систем. Методи складання рівнянь динаміки автоматичних систем. Диференційні та диференційно-різницеві рівняння. Нелінійні рівняння та рівняння зі змінними коефіцієнтами. Зведення рівнянь до форми у відхиленнях змінних.

**Математичні моделі динаміки автоматичних систем.** Математична модель динаміки системи в формі рівняння «Вхід-вихід» систем. Загальні рішення рівнянь типу «Вхід-вихід» лінійних безперервних та імпульсних систем. Вільна та вимушена складова перехідних процесів автоматичних систем. Математична модель динаміки системи у формі рівнянь стану. Керованість та спостережливість автоматичних систем. Математичні моделі динаміки у формі передатних та частотних функцій автоматичних систем. Типові динаміки ланки. Передатні та частотні функції типових ланок (безперервних та імпульсних). Частотні характеристики типових ланок. Структурні схеми автоматичних систем та правила їх перетворення. Передатні функції розімкнутих та замкнених систем та їх зв'язків із імпульсними перехідними функціями. Застосування сигнальних графів для визначення передатних функцій автоматичних систем. Поняття про частотні характеристики систем. Амплітудно-фазові та логарифмічні частотні характеристики.

**Нормативні елементи розділу:**

- |                       |                                     |
|-----------------------|-------------------------------------|
| 1. Об'єкт керування   | 13 Керуючий об'єкт                  |
| 2. Мета керування     | 14. Система керування               |
| 3. Керуюча дія        | 15. Збурення                        |
| 4. Керування          | 16. Задавальна дія                  |
| 5. Закон керування    | 17. Регулювання                     |
| 6. Алгоритм керування | 18. Стабілізація                    |
| 7. Якість керування   | 19. Слідкуюче регулювання           |
| 8. Показники якості   | 20. Програмне керування             |
| 9. Вхідна дія         | 21. Оптимальне керування            |
| 10. Зовнішня дія      | 22. Термінальне керування           |
| 11. Зворотній зв'язок | 23. Автоматичне керування           |
| 12. Дія відхилення    | 24. Керування із зворотнім зв'язком |



- |                                |                                    |
|--------------------------------|------------------------------------|
| 25. Керування за відхиленням   | 31. Астатична система              |
| 26. Керування за збуренням     | 32. Вільна складова процесу        |
| 27. Адаптивне керування        | 33. Вимушена складова процесу      |
| 28. Регулятор                  | 34. Диференційне рівняння динаміки |
| 29. Математична модель системи | 35. Передатна функція              |
| 30. Статична система           | 36. Структурна схема               |

## **ТЕОРІЯ ЛІНІЙНИХ АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ**

### **Стійкість лінійних безперервних автоматичних систем**

**Основні поняття та визначення стійкості автоматичних систем.** Зв'язок стійкості з коренями характеристичного рівняння замкнутої системи. Стійкість лінеаризованої системи «у малому» та стійкість «у великому». Теорема О.М. Ляпунова.

**Критерії стійкості.** Алгебраїчні критерії стійкості Рауса та Гурвіца. Критерій О.В. Михайлова. Критерій Найквіста. Оцінка стійкості систем за логарифмічними частотними характеристиками. Спосіб поділу частотних характеристик. Запаси стійкості. Критичний коефіцієнт підсилення системи. Стійкість систем із запізненням. Структурна стійкість. Вплив параметрів на стійкість автоматичних систем.

Застосування обчислювальних машин для дослідження стійкості і побудови областей стійкості автоматичних систем.

Особливості аналізу стійкості багатомірних систем.

**Нормативні елементи розділу:**

- |                       |                                     |
|-----------------------|-------------------------------------|
| 1. Стійкість САК      | 7. Критерій Найквіста               |
| 2. Теорема Ляпунова   | 8. Запас стійкості по амплітуді     |
| 3. Критерій Гурвіца   | 9. Запас стійкості по фазі          |
| 4. Критерій Рауса     | 10. D-розбиття                      |
| 5. Критерій Михайлова | 11. Критичний коефіцієнт підсилення |
| 6. АФЧХ               | 12. Логарифмічні АФЧХ               |

### **Якість процесів керування**

**Показники якості перехідних процесів** при ступневій дії: час перехідного процесу, коливання, перегулювання, характер затухання перехідного процесу. Точність системи під впливом типових вхідних дій. Коефіцієнт похибки. Статична та динамічна похибки.

**Непрямі методи оцінки якості перехідних процесів.** Оцінка якості за розподілом нулів та полюсів передатної функції замкнутої системи. Інтегральні оцінки. Частотні методи оцінки якості за реальною частотною характеристикою і за логарифмічними характеристиками.

**Прямі методи оцінки якості** за кривими перехідних процесів. Методи побудови кривих перехідних процесів. Машинні методи дослідження перехідних процесів.

**Нормативні елементи розділу:**

- |                                |                               |
|--------------------------------|-------------------------------|
| 1. Динамічний режим роботи САК | 7. Статичний режим роботи САК |
| 2. Перехідна характеристика    | 8. Типові вхідні дії          |
| 3. Імпульсна функція           | 9. Статична похибка           |
| 4. Час перехідного процесу     | 10. Коефіцієнти похибки       |
| 5. Перерегулювання             | 11. Інтегральні оцінки        |
| 6. Ступінь затухання коливань  |                               |

## **Корекція лінійних САК**

**Забезпечення заданої якості процесів керування.** Методи підвищення точності систем. Збільшення коефіцієнта підсилення. Підвищення порядку астатизму. Принцип інваріантності систем. Форми інваріантності. Принцип двоканальності. Комбінований принцип регулювання. Вплив додаткових зворотних зв'язків на роботу автоматичних систем. Жорстокі, гнучкі та змішані зв'язки та їх вплив на характеристики ланок, які охоплюються. Впровадження похідних та інтеграла в закон керування. Місце включення корегуючих пристроїв. Розрахунок типу та параметрів корегуючих пристроїв. Синтез корегуючих пристроїв за логарифмічними частотними характеристиками та методами розділу частотних характеристик.

**Типові корегуючі пристрої та їх реалізація.** Поняття про корегуючі пристрої на змінному струмі. Основні закони регулювання та типові регулятори. Визначення параметрів регуляторів із умови мінімуму узагальнених інтегральних оцінок.

**Аналіз динаміки особливих автоматичних систем.** Особливості динаміки автоматичних систем за присутністю ірраціональних та трансцендентних ланок. Розповсюдження критерію стійкості Найквіста на ірраціональні та трансцендентні системи.

Дослідження якості процесів ірраціональних та трансцендентних систем. Корекція ірраціональних та трансцендентних систем.

### ***Нормативні елементи розділу:***

- |                               |                                |
|-------------------------------|--------------------------------|
| 1. Точність САК               | 4. Комбіноване регулювання     |
| 2. Вплив порядку астатизму    | 5. Корежуючий пристрій         |
| 3. Принцип інваріантності САК | 6. Синтез корежуючих пристроїв |

### **Випадкові процеси у лінійних автоматичних системах**

***Випадковий процес.*** Математичне сподівання та кореляційна функція випадкового процесу. Стаціонарний випадковий процес. Визначення характеристик випадкового процесу з досліду. Поняття про спектральну щільність стаціонарного випадкового процесу та її зв'язок із кореляційною функцією, «Білий шум».

***Проходження випадкового сигналу через лінійну систему.*** Кореляційні функції та спектральні щільності вихідної змінної і помилки системи при стаціонарних випадкових сигналів зовнішніх діянь.

***Оцінка точності*** лінійних автоматичних систем при впливі на них випадкових дій. Способи обчислення середнього значення квадрату помилки системи при впливі випадкових дій. Методи підвищення точності. Синтез системи за мінімумом середньоквадратичної похибки.

### ***Нормативні елементи розділу:***

- |                           |                          |
|---------------------------|--------------------------|
| 1. Випадковий процес      | 3. Кореляційна функція   |
| 2. Математичне сподівання | 4. Спектральна щільність |

## **ТЕОРІЯ ЛІНІЙНИХ ІМПУЛЬСНИХ САК**

### **Загальна характеристика імпульсних систем**

***Визначення та класифікація імпульсних систем.*** Імпульсні системи з одним та декількома імпульсними елементами. Імпульсні системи з амплітудно-імпульсною, широтно-імпульсною, кодоімпульсною та комбінованою модуляцією. Числові системи з цифровими керуючими пристроями та машинами. Перевага числових систем керування. Задачі дослідження імпульсних систем.

***Математичні моделі імпульсних систем.*** Про особливості дослідження динаміки імпульсних систем. Диференційно-різницеви стани. Особливості математичних моделей імпульсних елементів, дискретних пристроїв та екстраполяторів. Передатні функції імпульсних систем. Вплив форми імпульсів на передатні функції. Врахування запізнення. Методи приблизного обчислення передатних

функцій. Врахування запізнення. Методи приблизного обчислення передатних функцій імпульсних систем. Частотні функції імпульсних систем.

Логарифмічні характеристики імпульсних систем. Заміна імпульсної системи еквівалентною безперервною системою.

**Аналіз динаміки лінійних імпульсних систем.** Стійкість імпульсних систем. Поняття стійкості. Необхідна та достатня умови стійкості імпульсних систем. Критерії стійкості імпульсних систем. Алгебраїчні критерії стійкості та особливості їх застосування.

**Оцінка стійкості імпульсних систем за логарифмічними псевдо-частотними частотними характеристиками.** Запаси стійкості. Застосування ЕОМ для дослідження стійкості та побудови областей стійкості імпульсних систем.

**Нормативні елементи розділу:**

- |                                    |  |
|------------------------------------|--|
| 1. Класифікація імпульсних САК     | 5. Z-перетворення                      |
| 2. Імпульсний елемент              | 6. Передатна функція ДСАК              |
| 3. Різницеві рівняння              | 7. Стійкість ДСАК                      |
| 4. Екстраполятор нульового порядку | 8. Псевдо-частотні характеристики ДСАК |
|                                    | 9. Запаси стійкості ДСАК               |

## **Якість лінійних імпульсних систем**

**Похибки при типових діях.** Коефіцієнти похибки та методи їх обчислення. Методи підвищення точності систем. Інваріантність імпульсних систем. Комбіноване керування.

**Поняття про якість перехідних процесів.** Критерії якості. Оцінка якості лінійних імпульсних систем. Інтегральні оцінки якості імпульсних систем та способи їх обчислення. Матричні методи оцінки якості імпульсних систем. Застосування обчислювальних машин для дослідження якості імпульсних систем.

**Корекція імпульсних систем.** Методи корекції імпульсних систем. Постановка задачі корекції імпульсних систем. Методи визначення параметрів безперервних корегуючих пристроїв.

**Методи визначення параметрів дискретних корегуючих пристроїв.** Спільне застосування корегуючих пристроїв імпульсних систем.

Машинні методи синтезу корегуючих пристроїв імпульсних та цифрових автоматичних систем і визначення параметрів цифрових автоматичних регуляторів.

**Нормативні елементи розділу:**

- |                                  |                        |
|----------------------------------|------------------------|
| 1. Динамічний режим роботи ДСАК  | 6. Типові вхідні дії   |
| 2. Перехідна характеристика ДСАК | 7. Статична похибка    |
| 3. Час перехідного процесу       | 8. Коефіцієнти похибки |
| 4. Перерегулювання               | 9. Інтегральні оцінки  |
| 5. Статичний режим роботи ДСАК   |                        |

**ТЕОРІЯ НЕЛІНІЙНИХ СИСТЕМ**

**Загальна характеристика нелінійних систем.** Визначення та класифікація нелінійних систем. Типові нелінійні елементи, їх характеристики та математичні моделі. Нелінійні системи з лінеаризованими і суттєво нелінійними елементами. Задачі та особливості дослідження нелінійних систем.

**Математичні моделі нелінійних систем.** Нелінійні диференційні та диференційно-різницеві рівняння і особливості динаміки нелінійних систем. Математична модель нелінійних систем в формі рівнянь стану. Структурні схеми нелінійних систем та їх перетворення. Частотні характеристики нелінійних систем. Логарифмічні характеристики нелінійних систем.

**Аналіз динаміки нелінійних систем.** Методи дослідження та розрахунків нелінійних систем. Поняття про стійкість нелінійних систем. Методи О.М. Ляпунова. Дослідження абсолютної стійкості нелінійних систем. Автоколивання. Фазова площина та її застосування для дослідження стійкості нелінійних систем із кусково-лінійними характеристиками. Метод гармонічної лінеаризації.

**Оцінка якості нелінійних систем.** Критерії якості. Точність та похибки нелінійних систем. Параметри автоколивань. Методи оцінки якості перехідних процесів нелінійних систем. Вимушені коливання нелінійних систем. Числові методи дослідження нелінійних систем на цифрових обчислювальних машинах.

**Корекція нелінійних систем.** Задачі та способи корекції нелінійних систем. Компенсація впливу нелінійності. Вплив корегуючих пристроїв на якості перехідних процесів нелінійних систем. Отримання ковзного та оптимального режимів у релейних системах другого порядку. Вібраційна лінеаризація.

Методи розрахунку корегуючих пристроїв нелінійних систем. Застосування методів фазової площини та гармонічної лінеаризації для визначення параметрів корегуючих пристроїв. Особливості розрахунку

нелінійних корегуючих пристроїв. Корегуючі пристрої нелінійних систем.

***Випадкові процеси в нелінійних автоматичних системах.***  
Проходження випадкового сигналу через нелінійний елемент. Статична лінеаризація нелінійних елементів. Вплив випадкових процесів на роботу нелінійних систем. Оцінка точності нелінійних систем при випадкових впливах. Розрахунок середньоквадратичної похибки.

***Нормативні елементи розділу:***

- |                                   |                                   |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Типові нелінійні елементи (НЕ) | 6. Фазова площина                 |
| 2. Математична модель НЕ          | 7. Метод гармонічної лінеаризації |
| 3. Стійкість НСАК                 | 8. Точність НСАК                  |
| 4. Абсолютна стійкість НСАК       | 9. Статична лінеаризації          |
| 5. Автоколивання                  | 10. Випадкові процеси в НСАК      |

## **ПЕРЕЛІК ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ**

- Лабораторна робота № 1. «Дослідження елементарних ланок лінійних САК».
- Лабораторна робота № 2. «Дослідження стійкості замкнутих лінійних САК».
- Лабораторна робота № 3. «Дослідження похибок САК».
- Лабораторна робота № 4. «Дослідження властивостей найпростіших імпульсних САК».
- Лабораторна робота № 5. «Дослідження стійкості та точності імпульсних САК».
- Лабораторна робота № 6. «Аналіз САК методом фазової площини».
- Лабораторна робота № 7. «Дослідження стійкості та автоколивань нелінійних САК».
- Лабораторна робота № 8. «Моделювання реальної САК на ПОЕМ та дослідження її характеристик».

## **ПЕРЕЛІК ТЕМ КУРСОВИХ РОБІТ**

- «Аналіз та синтез дистанційної слідкуючої системи на сельсинах».
- «Аналіз та синтез малопотужної слідкуючої системи».
- «Аналіз та синтез дистанційної силової слідкуючої системи».
- «Аналіз та синтез слідкуючої системи з місцевим зворотнім зв'язком».
- «Аналіз та синтез одновісного гіроскопічного стабілізатора».
- «Аналіз та синтез САК температури в печі».
- «Аналіз та синтез САК кутом курсу літака».
- «Аналіз та синтез системи стабілізації літака за креном».

## МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО САМОСТІЙНОЇ РАБОТИ ПРИ ВИВЧЕННІ КУРСУ

### Автоматичні системи і задачі теорії автоматичного керування

При вивченні теми необхідно з'ясувати сутність і значення автоматичних систем для розвитку народного господарства в області автоматизації, поліпшення якості продукції, прискорення технічного прогресу.

Спочатку слід засвоїти основні поняття і визначення теорії автоматичного керування, звернувши увагу на класифікацію систем за алгоритмами функціонування та керування. Вивчення принципів побудови САУ доцільно проводити на прикладі типових систем стабілізації швидкості обертання двигуна постійного струму незалежного збудження і слідкуючої системи положення робочого механізму. Рекомендується вникати у фізичні процеси, що відбуваються в окремих елементах САК в процесі регулювання.

При аналізі системи керування виявляється дуже зручним представити її у вигляді з'єднання деяких типових, елементарних динамічних ланок. При цьому будь-який реальний елемент системи (після лінеаризації його рівняння динаміки) може бути представлено одним або кількома типовими ланками, що істотно полегшує дослідження динаміки системи і дозволяє наочно показати процес перетворення в ній сигналів. Виявляється, що кількість таких типових ланок невелика. Спрямованість ланок дає можливість побудувати з типових ланок досить складну систему, вихідний сигнал в якій буде змінюватися таким же чином, як і у вихідній системі, що описується диференціальними рівняннями вищого порядку.

З викладеного випливає, що аналізу системи має передувати вивчення динамічних характеристик типових ланок. Необхідно знати диференціальні рівняння, передатні функції та часові характеристики типових динамічних ланок: пропорційної, аперіодичної, коливальної, ідеальної та реальної інтегруючої, ідеальної та реальної диференціюючої; вміти визначати передатні функції, складати і перетворювати алгоритмічні (структурні) схеми динамічних ланок спрямованої дії та їх з'єднання.

Алгоритмічна (структурна) схема САК наочно характеризує її динамічні властивості. За алгоритмічною схемою легко визначаються основні передатні функції САУ – розімкнутої та замкнутої системи, передатна функція похибки та передатні функції системи за збуреннями.



При вивченні алгоритмічної схеми САК слід усвідомити, як вона може бути отримана з функціональної схеми.

При вивченні питань математичного моделювання САК необхідно особливу увагу приділити можливостям сучасної обчислювальної техніки, як універсального засобу дослідження складних САУ.

**Література:** [1, с. 8-75].

**Запитання для самоперевірки:**

1. Що розуміють під динамічною ланкою і які типові динамічні ланки вам відомі?
2. Запишіть диференційні рівняння і передатні функції типових динамічних ланок.
3. Наведіть аналітичні вирази для перехідних характеристик типових динамічних ланок і приведіть відповідні їм графіки.
4. Визначте передатну функцію динамічних ланок з передатними функціями  $W_1(s) = \frac{k_1}{s}$  та  $W_2(s) = k_2$  при їх послідовному, паралельному та паралельно зустрічному включенні.

## **Основи аналізу неперервних лінійних систем**

При вивченні САК використовують два підходи: метод передатних функцій і частотних характеристик та метод простору стану. Класичним методом є використання передатних функцій, що дозволяє перейти від диференційних рівнянь у часовій області до алгебраїчних рівнянь в області зображень. Цей метод в основному розвивався як інженерний метод розв'язання практичних задач вручну.

Розвиток методу простору стану стимулювався появою швидкодіючих обчислювальних машин. Застосування цього методу дозволило вирішити задачі оптимального синтезу САК та розробити ефективні алгоритми аналізу систем управління на ЕОМ.

Вивчення теми необхідно розпочати зі з'ясування класичного методу. Необхідно засвоїти основні поняття та визначення: передатної функції, зображення та його основних властивостей; ознайомитися з таблицями перетворення оригіналу в зображення та навпаки.

При вивченні методу простору стану важливо не тільки засвоїти методику запису лінійного диференціального рівняння  $n$ -го порядку у вигляді системи  $n$  лінійних диференціальних рівнянь першого порядку, векторно-матрична запис яких і є рівнянням стану, а й твердо

усвідомити ряд нових понять: стан системи, вектор стану, вектор управління тощо. Слід також знати основні поняття, такі як керованість і спостережливість та їх фізичний зміст.

При вивченні цієї теми необхідно лише коротко зупинитися на основних визначеннях теорії випадкових процесів. Більш глибоко ці питання будуть вивчені у наступній темі.

**Література: [1, с. 63-66].**

**Запитання для самоперевірки:**

1. Сутність лінеаризації рівнянь динаміки САУ.
2. Запишіть загальний вигляд лінійного диференційного рівняння, що визначає зв'язок між вхідними та вихідними змінними динамічної системи.
3. Дайте визначення передатної функції динамічної системи і сформулюйте алгоритм для її визначення з диференційного рівняння.
4. Диференційне рівняння системи виду

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} + 3\frac{dy(t)}{dt} + 5y(t) = 2U(t),$$

де  $U(t)$  – вхідний сигнал, а  $y(t)$  – вихідний

Необхідно записати у вигляді рівнянь стану і зобразити відповідну цим рівнянням схему електронного моделювання.

5. Наведіть класифікацію САК по виду диференціальних рівнянь.

### **Моделі та загальні властивості стаціонарних неперервних лінійних систем**

Вивчення цієї теми необхідно розпочати зі з'ясування поняття моделі, класифікації моделей за їх типами та способами одержання і опису математичних моделей САК.

Треба засвоїти методіку складання опису системи в змінних стану і вміти переводити опис у формі "вхід-вихід" в опис у формі змінних стану та навпаки.

При вивченні динамічних характеристик систем управління слід акцентувати увагу на алгоритми, що орієнтуються на використання ЕОМ. Необхідно використовувати знання з частотних методів дослідження САК, отримані при вивченні матеріалу попередньої теми,

розширюючи поняття передатної функції одновірної системи на багатовірну.

Вивчення методів аналізу процесів у стаціонарних лінійних системах рекомендується почати з засвоєння класичних методів розрахунку оригіналів за їхніми зображеннями, а потім переходити до вивчення методів дослідження систем керування в часовій області при описі в просторі стану. Причому при вивченні методів дослідження необхідно звертати увагу на можливість алгоритмізації процесів обчислення та використання ЕОМ.

При розгляді питань використання графів для опису структур систем керування необхідно звернути увагу на можливість істотного спрощення дослідження досить складних багатомірних і багатоконтурних систем.

При вивченні випадкових процесів необхідно усвідомити фізичний сенс матриць кореляційних функцій та спектральних щільностей, звернувши увагу на алгоритми їх визначення на ЕОМ. При визначенні спектральних щільностей та дисперсій на виході динамічної системи, доцільно користуватися частотними методами.

**Література:** [1, с. 58-63].

**Запитання для самоперевірки:**

1. Яким чином можна перейти від опису системи у формі "Вхід-вихід" до опису системи у формі змінних стану та навпаки?
2. Сформулюйте основні правила перетворення структурних схем і графів систем управління.
3. Перелічіть основні характеристики випадкових процесів.

**Критерії і області стійкості звичайних неперервних стаціонарних систем**

Спочатку слід засвоїти фізичну сутність стійкості та математичного умови необхідної та достатньої умови стійкості лінеаризованої САК.

Для цього доцільно дослідити поведінку лінійної САК другого порядку, виведеної зі стану рівноваги. Потрібно чітко усвідомити зв'язок окремих показників перехідного процесу такої системи з величинами і знаками дійсної та уявної частин коренів характеристичного рівняння.

Тільки після ретельного аналізу зазначеного прикладу можна перейти до вивчення теорем Ляпунова, які дозволяють використовувати висновки, отримані при аналізі роботи лінеаризованих систем, на реальні системи автоматичного регулювання.

Математична умова стійкості лінеаризованої системи полягає в тому, що всі корені характеристичного рівняння замкнутої системи повинні мати від'ємну дійсну частину. Отже, висновки про стійкість лінеаризованої системи можна звести до знаходження коренів її характеристичного рівняння.

Однак без застосування обчислювальної техніки рішення алгебраїчних рівнянь вище третього ступеня пов'язано з вельми трудомісткими розрахунками. Тому в теорії автоматичного керування використовуються методи, які дозволяють встановити, не вдаючись до розв'язування рівняння, залежність між коефіцієнтами рівняння і знаком дійсної частини його коренів. Такі методи отримали назву критеріїв стійкості. Необхідно знати всі критерії стійкості, перераховані в програмі курсу, вміти вибирати в кожному конкретному випадку критерій, найбільш підходящий для даного випадку. Слід пам'ятати, що алгебраїчні критерії Рауса та Гурвіца доцільно застосовувати до систем, які описуються диференціальними рівняннями не вище п'ятого порядку, а критерій стійкості Михайлова – при дослідженні складних багатоканальних систем. Особливість критерію стійкості Найквіста полягає в тому, що він дозволяє вирішити питання про стійкість системи за її амплітудно-фазовими характеристики в розімкнутому стані і по логарифмічним амплітудних характеристикам. При цьому амплітудно-частотна характеристика може бути отримана експериментально. Треба знати, що передатна функція розімкнутої системи, що використовується для побудови амплітудної та фазової характеристики, повинна містити в собі передатні функції всіх ланок системи. До її складу також повинна входити ланка головною зворотного зв'язку.

Студент повинен навчитися судити по логарифмічним частотним характеристикам про стійкість системи, а також вміти визначати запас стійкості за амплітудою та фазою. Слід вивчити вплив зміни загального коефіцієнта підсилення системи на її стійкість, що найкраще ілюструється зміщенням кривої Михайлова.

Для з'ясування понять простору параметрів і області стійкості в цьому просторі слід пам'ятати, що стійкість системи регулювання залежить від стану коефіцієнтів диференційного і, відповідно, характеристичного рівняння, при зміні тих чи інших параметрів

системи зміниться і її стійкість; підбором цих змін можна перетворити систему зі стійкої в нестійку і навпаки.

Слід врахувати, що ряд параметрів системи можуть бути задані і визначатися вимогами технологічного процесу та конструктивними особливостями об'єкта регулювання. Є також параметри, які можна змінювати в певних межах з метою регулювання. Це позначається на розташуванні коренів на комплексній площині. Таким чином, якщо в характеристичному рівнянні здійснити заміну  $s = j\omega$ , то можна отримати рівняння геометричного місця точок, що розмежовує області з різним числом коренів в лівій півплощині. Сукупність отриманих граничних геометричних елементів ділить  $n$ -мірний простір змінних параметрів на області. З них тільки та область в просторі змінних параметрів, в якій всі корені характеристичного рівняння розташовані зліва від уявної осі комплексної площини, є областю стійкості.

Області з однаковим числом коренів в лівій півплощині – це область  $D$ , розбивка простору змінних параметрів системи на ці області називається  $D$ -розбиттям. Практично області стійкості досліджуються тільки при числі змінних параметрів не більше двох.

Одним з основних достоїнств  $D$ -розбиття є можливість судження про стійкість системи при зміні її змінних параметрів без повторних перевірок умов стійкості.

**Література:** [1, с. 76-137; 2, с. 6-7, 26-35].

***Запитання для самоперевірки:***

1. Дайте визначення стійкої САУ.
2. Сформулюйте першу теорему Ляпунова про стійкість лінеаризованої системи і поясніть її значення в аналізі САК.
3. Яка фізична сутність, причина явища нестійкості САК?
4. Як пов'язані стійкість системи з коренями її характеристичного рівняння?
5. Як отримати характеристичне рівняння САК?
6. Перерахуйте критерії стійкості і поясніть, чому викликана необхідність їх застосування.
7. Дайте визначення критерію стійкості Гурвіца.
8. У яких випадках доцільно застосування алгебраїчного критерію стійкості?
9. Що таке годограф Михайлова? Як формулюється критерій?
10. Коли доцільно застосування критерію Найквіста?

11. Сформулюйте критерій Найквіста для систем стійких в розімкнутому стані.
12. Наведіть формулювання критерію Найквіста для систем нестійких у розімкнутому стані.
13. Наведіть формулювання логарифмічного критерію стійкості.
14. Побудуйте логарифмічні характеристики для стійкої та нестійкою розімкнутих систем.
15. Які системи називаються структурно-стійкими і структурно-нестійкими?
16. Який коефіцієнт називається граничним і як його знайти за критерієм Гурвіца?
17. Як знайти запаси стійкості по амплітуді і по фазі по логарифмічним амплітудно-фазовим характеристикам?
18. Як здійснюється D-розбиття? Правила штрихування границь.

### **Перехідні процеси та якість неперервних стаціонарних систем управління**

Вивчення даної теми рекомендується почати з аналізу виду кривих перехідного процесу для стійких систем. При цьому необхідно усвідомити, що таке поняття "показники якості перехідного процесу регулювання". Про якість перехідного процесу судять за низкою показників (швидкодія, коливальність, перерегулювання), які далеко не завжди можуть бути визначені прямими методами. Головне завдання дослідження якості – встановити вплив структури і параметрів системи на швидкість і плавність протікання перехідних процесів.

Звичайно основні показники якості визначаються для одиничного ступеневої впливу при нульових початкових умовах, тобто по перехідній характеристиці САК. Для лінійних систем з лінійними параметрами завдання успішно вирішується непрямыми методами, які, у свою чергу, діляться на три групи – частотні, інтегральні і кореневі методи. В даний час для непрямого дослідження якості найчастіше використовується метод коефіцієнтів похибки, частотний метод і метод інтегральних оцінок.

Окремі показники якості можна визначити по виду частотних характеристик. Студент повинен мати уявлення про частотні критерії якості, тобто способи визначення окремих показників якості за різними частотним характеристикам.

Як будь-яка динамічна система, САК може перебувати в одному з двох режимів – сталому (стаціонарному) і динамічному (перехідному).

Точність роботи системи автоматичного регулювання зазвичай визначається похибкою в усталеному режимі, яка для заданої системи залежить від виду зовнішнього впливу та закону його зміни в часі. Якщо зовнішні впливи (і параметри системи) не змінюються в часі, то сталий режим носить назву статичного. Важливо відзначити, що в залежності від наявності похибки в статичному режимі, системи діляться на статичні та астатичні по відношенню до вхідного (або збурюючого) зовнішнього впливу. При цьому статична система по відношенню до вхідного впливу може стати астатичною по відношенню до збурення (наприклад за моментом навантаження на валу електродвигуна). Необхідно мати чітке уявлення про фізичну природу виникнення статичної похибки або її відсутності в системі для даного виду зовнішнього впливу, а також про вплив коефіцієнта підсилення системи на величину похибки.

При вивченні теми слід звернути увагу на діалектичне протиріччя (закон єдності і боротьби протилежностей) між точністю роботи системи та її стійкістю: для зменшення статичної похибки необхідно збільшувати коефіцієнт підсилення системи, однак це призводить до зменшення запасів стійкості, а при значенні коефіцієнта підсилення більше граничного система стає нестійкою і, отже, неприцездатною.

Не менш важливе значення має розуміння діалектичного протиріччя між випадковою і динамічною похибкою. З точки зору зменшення динамічної помилки необхідно розширювати смугу пропускання системи, однак це призводить до зростання випадкової помилки. Компроміс тут досягається вибором такого значення смуги пропускання, при якому сумарна помилка мінімальна.

Для синтезу систем, що мають задані показники якості, широко використовуються інтегральні критерії якості. Вони характеризуються одним числом, значення якого достатньо повно відображає перебіг процесу у даному інтервалі часу. Інтегральні оцінки лягли в основу так званого аналітичного конструювання регуляторів – одного з найбільш перспективних методів синтезу автоматичних систем. Студент повинен усвідомити їх сутність і мати уявлення про ці критерії. Слід пам'ятати, що основний недолік непрямих методів полягає в наближеності оцінок показників якості перехідного та сталого режимів.

**Література:** [1, с. 138-182; 2, с. 9-10, 42-45].

### ***Запитання для самоперевірки:***

1. Перелічіть основні показники якості перехідних процесів.
2. Які ви знаєте прямі методи визначення показників якості?
3. Які непрямі критерії (методи) дослідження якості ви знаєте?
4. Побудуйте амплітудно-частотну характеристику замкнутої системи і поясніть, як по ній оцінити якість роботи системи.
5. Який зв'язок між показниками якості і точністю роботи САК?
6. Дайте визначення статичної і астатичної САК.
7. Як впливають коефіцієнт підсилення і смуга пропускання на точність системи?
8. Намалюйте графік зміни динамічної похибки замкнутої астатичної системи з астатизмом другого порядку при зміні вхідного впливу за квадратичним законом.
9. Яка сутність методу коефіцієнтів похибок і на яких припущеннях він заснований?
10. Як визначаються коефіцієнти похибок за передатними функціями системи?
11. Намалюйте графік зміни динамічної похибки замкнутої астатичної системи з астатизмом першого порядку при зміні вхідного впливу за квадратичним законом.
12. Який існує зв'язок коефіцієнтів похибок з параметрами системи?
13. Запишіть вирази для першого, не рівного нулю, коефіцієнта похибки в статичній системі і астатичних системах з астатизмом першого і другого порядку.
14. Для чого використовуються інтегральні критерії якості? У чому сенс інтегральних оцінок?
15. Дайте визначення основних типів інтегральних квадратичних оцінок і вкажіть їх особливості.

### **Методи синтезу лінійних стаціонарних систем автоматичного керування**

У САК мають місце суперечності між точністю відтворення вхідного впливу і зменшення впливу збурень. Тому в задачах якості завжди доводиться стикатися з конфліктними ситуаціями, які вирішуються шляхом введення в основний контур САК спеціальних пристроїв, що називаються корегуючими.

Розрізняють два основних способи корекції: послідовна і паралельна (зворотні зв'язки). При вивченні послідовної корекції необхідно звернути увагу на типи застосовуваних корегуючих



пристроїв, на частотні характеристики диференціюючих, інтегруючих і інтегро-диференціюючих пасивних електричних ланцюгів. Слід простежити за тим, як змінюються частотні характеристики (звичайні та логарифмічні). Чому після введення корегуючих ланцюгів при заданому коефіцієнті підсилення вихідна нестійка система стає стійкою з прийнятними запасами стійкості по амплітуді та фазі.

Потрібно уважно розібратися з інженерною методикою розрахунку корегуючих пристроїв за допомогою логарифмічних частотних характеристик.

Для забезпечення задачі синтезу здійснюється типізація логарифмічних характеристик розімкнутої САК. За заданими вимогами до якості системи будеться бажана логарифмічна характеристика та на підставі порівняння її з логарифмічною характеристикою розімкнутої не скорегованої системи вибирається корегуючий пристрій.

**Література: [1, с. 198-234; 2, с.37-42; 3, с. 638-658].**

***Запитання для самоперевірки:***

1. Охарактеризуйте основні методи корекції САК.
2. Поясніть фізичний зміст корекції САК шляхом введення похідних від сигналу неузгодженості та закону керування.
3. Яке значення жорсткого зворотного зв'язку, поясніть його вплив на динамічні характеристики ланок, що охоплюються.
4. Дайте порівняльну характеристику послідовних і паралельних корегуючих пристроїв.
5. Як побудувати бажану логарифмічну амплітудно-частотну характеристику САК?
6. Яка сутність методики розрахунку корегуючої ланки за допомогою логарифмічних частотних характеристик?

**Дискретні і імпульсні САУ**

У даній темі основну увагу слід звернути на системи з амплітудно-імпульсною модуляцією. Необхідно добре освоїти математичний апарат дослідження імпульсних систем, а також методи розрахунку систем. Виклад матеріалу теми базується на методах аналізу і синтезу лінійних неперервних систем, тому для вивчення цієї теми обов'язкове знання теорії безперервних систем. Потрібно уважно розглянути приклади, наведені у рекомендованій літературі, і самостійно вирішити ряд завдань. Необхідно засвоїти, що для

інженерного вирішення питань в імпульсних системах велике значення має дискретне перетворення Лапласа, що є аналогом звичайного перетворення Лапласа, що використовуються при дослідженні систем безперервної дії. Треба добре вивчити типи формуючих (запам'ятовуючих) пристроїв та характерні відмінні особливості їх частотних характеристик. Слід засвоїти умови стійкості імпульсних систем і знати основні критерії стійкості (критерії Найквіста, Шур-Кона та інші). Важливо знати способи побудови перехідних характеристик імпульсних систем.

Необхідно також познайомитися з методами опису дискретних та імпульсних систем в дискретному просторі стану. Такий опис дискретних систем особливо зручний при їх моделюванні на ЕОМ. Крім того, при моделюванні безперервних систем управління на ЕОМ, як правило, використовується дискретний аналог безперервної системи, і природним аналогом неперервної форми Коші є опис дискретної системи в дискретному просторі станів.

У зв'язку з широким використанням мікропроцесорів, переважна більшість сучасних систем керування навіть безперервними об'єктами і безперервними процесами стають дискретними. Причому в системі є квантування за часом у зв'язку з дискретним характером роботи керуючої ЕОМ, а також квантування за рівнем у зв'язку з необхідністю перетворення аналогових сигналів від вимірювачів змінних стану в код ЕОМ і перетворення коду ЕОМ в аналогові сигнали управління на виконавчі пристрої.

### **Література: [1, с. 242-295].**

#### ***Запитання для самоперевірки:***

1. У чому полягає відмінність між імпульсними релейними і цифровими системами автоматичного регулювання та керування?
2. Які є види модуляції імпульсних систем?
3. Наведіть приклади імпульсних систем.
4. Вкажіть переваги імпульсних систем.
5. Що таке "формуючий елемент"?
6. Яка суть поняття "приведена безперервна частина системи"?
7. Запишіть передатну функцію якого-небудь формуючого елемента.
8. Яка різниця між диференційними і різницеvими рівняннями?
9. Яка сутність дискретного перетворення Лапласа?
10. Перерахуйте основні правила і теореми Z-перетворення

11. Поясніть сутність Z-перетворення.
12. Що розуміється під "модифікованим Z- перетворення"?
13. Як визначити дискретну передатну функцію розімкнутої імпульсної системи?
14. У чому полягає особливість частотних характеристик імпульсних систем?
15. Як будуються логарифмічні частотні характеристики імпульсних систем?
16. Як визначити передатну функцію замкненої імпульсної системи?
17. Викладіть умову стійкості імпульсної системи.
18. Як побудувати перехідну характеристику імпульсної системи?
19. Як оцінити якість імпульсної системи по перехідній характеристиці?
20. Яка сутність безперервної та імпульсної корекції?
21. Яка САК називається цифровою?

### **Звичайні нелінійні САК**

При вивченні даної теми має бути отримано ясне представлення про те, що реальні САК є нелінійними системами. Розглянуті в попередніх темах методи дослідження справедливі для лінеаризації рівнянь динаміки. Що впливає з основної особливості нелінійних систем: до них непридатний принцип суперпозиції. У зв'язку з цим не можна застосовувати безпосередньо до нелінійних систем всі ті методи дослідження САК, що основані на перетвореннях Лапласа і Фур'є.

Процеси в нелінійних системах більш різноманітні і складні, ніж в лінійних. Особливу увагу слід звернути на те, що в замкнених нелінійних системах можуть виникнути стійкі коливання певної амплітуди і частоти – автоколивання.

Можливість існування незатухаючих коливань в нелінійних системах є їх принциповою відмінністю від лінійних систем. Причому в ряді нелінійних систем наявність незатухаючих коливань – необхідна умова нормальної роботи нелінійної системи, що дозволяє істотно поліпшити показники її якості; це має місце, наприклад, при вібраційної лінеаризації нелінійної системи.

Необхідно засвоїти основні методи аналізу нелінійних систем – метод фазової площини і метод гармонійного балансу.

Слід мати на увазі, що метод фазової площини фактично є методом простору стану для двох змінних.

При дослідженні нелінійних систем шляхом лінеаризації нелінійності, наприклад при гармонійній лінеаризації, необхідно пам'ятати, що коефіцієнти лінеаризації залежать від амплітуди і частоти коливань системи, і, значить, при зміні вхідних сигналів ці коефіцієнти також змінюються. Крім того, всі методи лінеаризації – наближені, і правомірність їх застосування в кожному окремому випадку необхідно розглядати окремо.

Необхідно передусім звернути увагу на типи нелінійностей в САК та їх характеристики. Потрібно ознайомитися з методами зображення нелінійних елементів на структурних схемах і способом перетворення структурних схем до виду, зручного для дослідження. Потім рекомендується ознайомитися з фазовим представленням перехідного процесу. Важливо усвідомити, що положення точки, що зображує стан системи в фазовому просторі, визначається координатами, відповідними початковим умовам руху системи. Тому в якості координат фазового простору вибирають величини, відповідні необхідним для вирішення диференційного рівняння САК початковим умовам. Далі для рівнянь виключається час і знаходяться зв'язку тільки між фазовими координатами.

Траєкторія руху точки у фазовому просторі (фазові траєкторії) відображає зміни в стані системи протягом перехідного процесу і дає якісне уявлення про характер її руху. Однак вони нічого не говорять про час перехідного процесу або про швидкість зміни параметрів системи. Для систем до другого порядку включно з вигляду фазових траєкторій можна зробити ряд висновків, що представляє практичну цінність. Так, за фазовими траєкторіями можна судити про поведінку системи при великих і малих відхиленнях. Тобто вирішити питання про стійкість САК в "малому" і в "великому", з'ясувати можливість виникнення автоколивань, визначити їх амплітуду тощо.

Метод фазових траєкторій втрачає наочність для систем четвертого порядку і вище.

Особливим для САК є режим автоколивань, тому слід з'ясувати його особливості, вивчити один з наближених методів визначення амплітуд і частот автоколивань, запропонований Гольдфабром. Даний метод заснований на можливості подання характеристики нелінійної частини системи при гармонічному впливі на її вхід у вигляді комплексного коефіцієнта підсилення, що залежить не від частоти, а від амплітуди вхідного сигналу. При цьому можна побудувати на одному і тому ж графіку амплітудно-фазову характеристику лінійної частини системи і характеристику, що відповідає нелінійній частині і яка залежить від амплітуди вхідного сигналу. За взаємним

розташуванням зазначених характеристик можна судити про стійкість САК, про автоколивання, визначити частоту автоколивань та їх амплітуду.

Подібного роду завдання можуть бути порівняно просто вирішені за допомогою ЕОМ. Необхідно звернути увагу на клас нелінійних систем з так званої змінною структурою. Ці системи в останній час набули широкого поширення в промислових системах керування. Причому для цих систем також характерний режим роботи з незатухаючими коливаннями, так званий ковзний режим, за допомогою якого вдається отримати винятково високі показники якості системи управління зі змінною структурою. Наявність ковзного режиму – принципово необхідна умова руху системи по різноманіттю.

**Література: [1, с. 419-494].**

***Запитання для самоперевірки:***

1. Дайте визначення нелінійної системи.
2. Вкажіть відомі вам типи нелінійностей та їх статичні характеристики.
3. Як вибираються координати для побудови фазових траєкторій?
4. Для систем якого порядку зручний метод фазових траєкторій?
5. Яка сутність виникнення автоколивань?
6. Зобразіть фазову траєкторію стійкої і нестійкої системи, а також системи, де можливі автоколивання.
7. Запишіть математичну умову виникнення автоколивань.
8. Як визначити комплексний коефіцієнт підсилення нелінійної частини системи?
9. У чому полягає сутність методу Гольдфарба?
10. Як оцінюється стійкість автоколивань за методом Гольдфарба?

## ЛІТЕРАТУРА

1. Самотокін Б.Б. Лекції з теорії автоматичного керування: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. – Житомир: ЖІТІ, 2001. – 508 с.
2. Свістельник С.С., Тютюнник А.Г., Богдановський М.В. Методичний посібник для виконання контрольних та курсових робіт з курсу «Теорія автоматичного керування» для студентів денної та заочної форми навчання. – Житомир: ЖДТУ, 2010. – 64 с.
3. Топчеев Ю.И. Атлас по проектированию систем автоматического регулирования. – М: Машиностроение, 1989. – 752 с.
4. Зайцев Г.Ф. Теория автоматического управления. – Киев: Вища шк., 1988. – 431 с.
5. Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления. – М.: Наука, 1986. – 616 с.
6. Теория автоматического управления. Ч. 1 / Под ред. А.А. Воронова. – М.: Высш. шк., 1977. – 304 с.
7. Теория автоматического управления. Ч. 2 / Под ред. А.А. Воронова. – М.: Высш. шк., 1977. – 268 с.
8. Бесекаерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1975. – 768 с.







