

Передмова

Сучасний етап розвитку сільського господарства характеризується широким упровадженням систем автоматичного керування, які на початку ХХІ-го століття суттєво ускладнились, оскільки відбувся перехід від автоматизації окремих об'єктів до комплексної автоматизації виробничих процесів та одночасного керування великою кількістю взаємопов'язаних об'єктів, які зустрічаються у тваринництві, птахівництві і рослинництві. Так, наприклад: у птахівництві – керування мікрокліматом у пташниках, інкубаторах, вивідних шафах; у рослинництві – підтримання в спорудах закритого ґрунту не тільки параметрів мікроклімату, але й температури та вологості землі, температури й концентрації живильного розчину поливної води тощо.

Сільське господарство є специфічною галуззю народного господарства, де поєднуються технічні пристрої з біологічними об'єктами, що ускладнює питання автоматичного керування і вимагає розробки нових технічних засобів автоматики, які відповідали б вимогам виробництва сільськогосподарської продукції.

Для обслуговування таких автоматичних систем необхідно мати висококваліфікований інженерно-технічний персонал. Тому дисципліна «Теоретичні основи автоматики» є базовою у навчальних планах ряду бакалаврських програм з технічних спеціальностей у вищих школах України. Даний посібник написаний відповідно до програми підготовки фахівців за напрямками: 6.100101 «Енергетика та електротехнічні системи в агропромисловому комплексі», 6.050701 «Електротехніка та електротехнології», 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», а також становить теоретичну базу багатьох спеціальних дисциплін: «Автоматизований електропривод», «Цифрові системи керування», «Електротехнології в АПК» та інші.

Книга містить дев'ять розділів, в яких відображено основні питання теорії автоматичного керування та технічних засобів автоматики, необхідні спеціалістам з автоматизації виробничих процесів, як в сільському господарстві, так і в інших галузях народного господарства.

У першому розділі висвітлено загальні поняття, визначення і завдання теорії автоматичного керування, наведена класифікація автоматичних систем та основні закони регулювання.

У другому розділі наведені статичні та динамічні характеристики елементів і систем автоматичного керування. Крім цього, розглянуто типові динамічні ланки, рівняння динаміки систем і методи їхнього розв'язання, а також поняття про передаточні функції, часові і частотні характеристики.

У третьому розділі подано основні схеми, що використовуються в автоматичній, правила перетворення структурних схем лінійних систем та основні властивості об'єктів керування.

У четвертому розділі наведені методи визначення стійкості систем автоматичного керування.

У п'ятому розділі розглянуті питання оцінки якості керування та методи побудови кривих перехідного процесу.

Шостий розділ присвячений визначенню точності роботи систем та синтезу коректуючих пристроїв за допомогою логарифмічних та амплітудо-фазо-частотних характеристик.

У сьомому розділі подані характеристики випадкових процесів, методи розрахунку точності та синтезу систем автоматичного керування при випадкових вхідних і збурювальних діях.

У восьмому розділі наведені типові суттєві нелінійності і їхні характеристики та методи дослідження нелінійних систем.

У дев'ятому розділі розглянуто будову, принцип роботи і характеристики електричних датчиків різних фізичних величин та виконавчих механізмів, що найчастіше використовуються для автоматизації технологічних процесів.

Автори намагались подати матеріал в найбільш зручній для читача формі. Загальні концепції теорії наводяться без доведень. Математичний апарат висвітлено у відповідних розділах і в додатках посібника.

Велику увагу автори приділяють методам розрахунку та досліджень систем автоматичного керування. Так, для розв'язання однієї і тієї ж задачі вказано, як правило, декілька методів, зокрема, з використанням пакетів прикладних програм Matlab і Mathcad.

Даний посібник призначений для студентів, аспірантів електротехнічних спеціальностей і буде корисним інженерно-технічним працівникам, які займаються питаннями автоматизації технологічних процесів. Поданий в посібнику матеріал є теоретичною базою для практичного вивчення реальних автоматичних систем.

При написанні посібника використовувався досвід викладання дисципліни в Національному університеті біоресурсів та природокористування України та в Бережанському агротехнічному інституті.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СИСТЕМИ ТА ЕЛЕМЕНТИ АВТОМАТИКИ

1.1. Короткий історичний нарис розвитку теорії автоматичного керування

Теорія автоматичного керування (ТАК) є теоретичною основою, на базі якої розроблено більшість автоматичних пристроїв. Предметом вивчення ТАК є принципи побудови, методи аналізу і синтезу досить поширених систем автоматичного керування і регулювання. Задачі керування і відповідні методи й засоби їхнього вирішення з'явилися разом з виникненням цивілізації. Тривалий час теорія і практика керування розвивались під впливом необхідності вирішення задач керування технічними об'єктами. Ці задачі стали особливо актуальними після появи перших промислових регуляторів у XVIII ст., хоча окремі автоматичні регулятори створювались і раніше, але впливу на формування техніки і теорії автоматичного керування не мали. Так, першими промисловими регуляторами цього періоду були: автоматичний поплавковий регулятор живлення котла парової машини, побудований у 1765 р. І. Ползуновим в Барнаулі; відцентровий регулятор швидкості парової машини, на який у 1784 р. одержав патент англійський механік Дж. Ватт; перший програмний пристрій керування ткацьким верстатом від перфокарти, побудований у 1808 р. Ж. Жаккаром. Подальший розвиток техніки призвів до виникнення одного з напрямків теорії керування – теорії автоматичного керування (регулювання). Все це спонукало до проведення теоретичних досліджень. У другій половині XIX ст. з'явилися фундаментальні наукові роботи, які заклали методологічну базу: роботи Дж. Максвелла «Про регулятори» (1866) і професора Петербурзького технологічного інституту І. Вишнеградського «Про загальну теорію регуляторів» (1876) і «Про регулятори прямої дії» (1877). У дослідженнях Дж. Максвелла та І. Вишнеградського об'єкт керування – машина і регулятор – розглядається як єдина динамічна система. У цих роботах встановлено системний підхід у проблемі дослідження найрізноманітніших за принципом дії і конструкції систем, закладено основи теорії стійкості систем регулювання та обґрунтовано ряд важливих закономірностей регулювання за принципом зворотного зв'язку.

У кінці XIX ст. – в першій половині XX ст. з розвитком багатьох галузей промисловості, транспорту, систем зв'язку, з'являються все більш складні системи автоматики, що потребувало подальшого розвитку теорії автоматичного керування. Цей період відмічений роботами професора Харківського університету О. Ляпунова (1857 - 1918), який є основоположником теорії стійкості динамічних систем. Він запропонував оцінювати стійкість системи на основі аналізу рівняння динаміки, що

описує систему. Е. Раусом у 1874 р. і А. Гурвіцем у 1895 р. були розроблені алгебраїчні критерії стійкості. Опубліковуються роботи: робота Х. Найквіста (1932), в якій розглядається критерій стійкості радіотехнічних підсилювачів із зворотним зв'язком, побудований на властивостях частотної характеристики розімкнутої системи, і робота А. Михайлова «Гармонічний метод в теорії регулювання» (1938), в якій доведена доцільність використання частотних методів в теорії регулювання і запропоновано новий критерій (критерій Михайлова), який не вимагав попереднього розмикання кола регулювання.

У 1946 р. Г. Боде і Л. Мак-Кол ввели логарифмічні частотні характеристики. Р. Флорд для дослідження якості запропонував апроксимувати вагову частотну характеристику сумою трапецій. Г. Браун, А. Холл, Д. Кемпбелл, Г. Честнат, В. Солодовников завершили розробку частотних методів синтезу і проектування систем, зручних для інженерних розрахунків.

В 30–50-і роки ХХ ст. розробляються основи теорії нелінійних систем. Завдання суттєво ускладнювалось із-за відсутності загального математичного апарату для нелінійних задач. Зрушення в цьому напрямку відбулися тоді, коли зі всієї множини окремих видів нелінійних систем було відібрано достатньо широко розповсюджені в практиці системи, в яких можна виділити дві частини: лінійну динамічну і нелінійну статичну. Найбільш детально було досліджено кусково-лінійні апроксимації нелінійних статичних характеристик. У 1959 р. румунський учений В. Попов розробив точний метод аналізу стійкості одного класу нелінійних систем в частотній області.

Велике значення для якісного дослідження нелінійних систем мають методи, які ґрунтуються на представленні перехідних процесів траєкторіями у фазових площинах і просторі. Для визначення параметрів автоколивань і умов їхнього виникнення наближеними методами М. Криловим і М. Боголюбовим (1934) було розроблено метод гармонічного балансу. Л. Гольдфарб подав графоаналітичний метод знаходження в першому наближенні частоти і амплітуди основної гармоніки автоколивань за допомогою частотних характеристик.

Я. Ципкін і Б. Хамель розробили основи теорії релейних систем.

Л. Понтрягін, Р. Беллман, А. Летов, М. Красовський та ін. є основоположниками теорії оптимального керування. У 1956 р. розроблено і сформульовано метод динамічного програмування Беллмана і принцип максимуму Понтрягіна, які широко застосовуються в теорії оптимальних процесів.

Розроблено універсальний метод дослідження систем автоматичного керування – метод простору станів. У даний час ведеться робота над теорією систем із багатьма регульованими параметрами, систем екстремального регулювання та їхньої оптимізації.

Для дослідження складних систем розробляються і використовуються пакети прикладних програм для імітаційного моделювання процесів.

1.2. Основні поняття та визначення

У народному господарстві використовується велика кількість машин, установок, призначених для виконання різноманітних функцій. Більшість виробничих процесів частково чи повністю автоматизовані. Корінь наведених термінів «авто» походить з давньогрецького і означає «сам», «самостійний».

Автоматизація – вищий етап розвитку виробничої техніки, який характеризується звільненням людини від фізичної праці і від виконання функцій управління і контролю за машинами.

Виділяють такі рівні автоматизації:

1. Часткова автоматизація. Автоматизація тільки окремих виробничих операцій. Не звільняє цілком людину від участі у виробництві.
2. Комплексна автоматизація. Стосується технологічного процесу і означає автоматичне виконання всього комплексу операцій, об'єднаних загальною системою керування. Функція людини – спостереження, аналіз і зміна режимів процесу.
3. Повна автоматизація. Вибір і узгодження режимів роботи здійснює спеціальний автомат. Функція людини – огляд, профілактика, ремонт, перебудова всієї системи.

Основні переваги автоматизації полягають у забезпеченні:

- зростання продуктивності та поліпшення умов праці;
- виконання робіт у важкодоступних чи взагалі недоступних для людини ділянках (радіоактивні зони, космос, окремі види металургійного та гірничого виробництва);
- підвищення точності, якості технологічних процесів і відповідних виробів;
- зростання надійності та техніко-економічних показників і загальної культури виробництва та кваліфікації обслуговуючого персоналу.

Під *автоматикою* розуміють галузь науки і техніки, яка вивчає і застосовує теорію автоматичного керування, принципи побудови систем автоматичного керування та технічні засоби для реалізації цих систем.

Автоматизований (автоматичний) процес може бути досить простим (наприклад, забезпечення сталого рівня рідини в деяких посудинах) і досить складним (забезпечення потрібного режиму роботи літака за допомогою автопілота).

Автоматизація виробництва здійснюється за допомогою автоматичних пристроїв (автоматів). *Автомат* – установка (машина, агрегат), яка працює за чітко заданим алгоритмом без безпосередньої участі людини. Пристрої автоматичного керування забезпечують необхідні зміни в ході технологічних процесів.

Сучасні системи керування технологічними процесами характеризуються великою кількістю і різноманітністю технологічних параметрів, систем керування (регулювання) і об'єктів керування. Так, під *системою автоматичного керування* (САК) розуміють сукупність об'єктів керування (робочої машини, механізму) та з'єднаних певним чином елементів автоматики, взаємодія яких забезпечується розв'язанням поставленого завдання керування об'єктом.

Параметр технологічного процесу – фізична величина технологічного процесу, наприклад, температура, тиск, рівень, об'єм, маса, напруга тощо. Параметр технологічного процесу, який необхідно підтримувати постійним або змінювати за заданою програмою чи за певним законом, називається *регульованим параметром*. Значення регульованої величини, одержане в певний момент часу на основі даних певного вимірювального приладу називається *вимірним значенням*.

Вимірний і регульований параметри технологічного процесу можуть при необхідності перетворюватися первинним вимірювальним приладом (датчиком) у будь-які уніфіковані сигнали. Якщо датчик (наприклад, термопара, термоперетворювач опору, тензоперетворювач та ін.) видає не уніфікований сигнал, то для приведення його до стандартного діапазону повинен бути встановлений відповідний перетворювач сигналів. Також можна використовувати вимірювачі – регулятори з універсальним входом, які підтримують підключення більшості найбільш поширених типів датчиків без використання перетворювача сигналів.

Об'єкт керування (ОК) чи об'єкт регулювання – пристрій (установка, чи будь-який інший об'єкт), необхідний режим роботи якого повинен підтримуватись зовні спеціально організованими керуючими діями. Так, будь-який об'єкт керування можна подати у вигляді структурної схеми (рис.1.1)



Рис. 1.1. Структурна схема об'єкта керування

Канал, через який збурювальна дія $f(t)$ впливає на вихідну величину $y(t)$ об'єкта, називають *каналом збурення КЗ*.

Канал впливу вхідної дії $x(t)$ на вихідну величину $y(t)$ об'єкта називається *каналом керування (КК) об'єкта*.

Вихідні величини каналів додаються (віднімаються) з допомогою суматора.

Об'єктами керування можуть бути, наприклад, піч, реактор, теплообмінник, а також група технологічних апаратів чи інше технологічне обладнання. Класифікація об'єктів керування наведена в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Класифікація об'єктів керування

Класифікація об'єктів керування	Коротка характеристика об'єкта керування
1. За характером проходження технологічного процесу	• Циклічні, періодичні • Неперервно-циклічні • Неперервні
2. За характером усталеного значення вихідної величини об'єкта	• Об'єкти з самовирівнюванням. Самовирівнюванням процесу регулювання називається властивість регульованого об'єкта після порушення стану рівноваги повернутися в цей стан самостійно, без участі людини чи регулятора. Самовирівнювання сприяє більш швидкій стабілізації регульованої величини і, відповідно, полегшує загалом роботу людини чи регулятора. • Об'єкти без самовирівнювання
3. За структурою об'єкта	• Без запізнення • Із запізненням. Наявність запізнення – характерна особливість більшості технологічних об'єктів, яка пояснюється кінцевою швидкістю поширення потоків інформації в технологічних об'єктах (транспортне запізнення)
4. За кількістю вхідних і вихідних величин і їхнім взаємозв'язком	• Одномірні (один вхід і один вихід) • Багатомірні багатозв'язані – наявність взаємного впливу технологічних параметрів один на іншого • Багатомірні незв'язані – незначний взаємозв'язок між технологічними параметрами
5. За видом статичної характеристики і характером математичних співвідношень	• Лінійні • Нелінійні

Закінчення таблиці 1.1

6. За поведінкою об'єкта керування в статичному режимі	• Статичні. Однозначна залежність між вхідною і вихідною діями (статичний стан). Прикладом є будь-який тепловий об'єкт. • Астатичні. Залежність відсутня. Наприклад, залежність кута повороту ротора електродвигуна від прикладеної напруги (при подачі напруги кут повороту буде постійно збільшуватись, тому однозначна залежність у нього відсутня).
7. За розподіленістю об'єкта керування	• Локальні об'єкти керування • Розподілені об'єкти керування
8. За типом стаціонарності об'єкта	• Стаціонарні • Нестаціонарні. Параметри нестаціонарного об'єкта на протязі часу змінюються. Наприклад, хімічний реактор з каталізатором, активність якого знижується протягом певного часу.
9. За залежністю від інтенсивності випадкових збурень, що діють на об'єкт	• Стохастичні • Детерміновані
10. За напрямком дії	• Об'єкти прямої (нормальної) дії • Об'єкти зворотної (реверсивної) дії
11. За здатністю накопичувати робоче середовище (ємнісні і багатоемнісні об'єкти)	• Неємнісні об'єкти • Ємнісні об'єкти. Об'єкти регулювання володіють здатністю акумулювати робоче середовище. Запас накопиченої об'єктом енергії (речовини) називається ємністю об'єкта. Фізично вона проявляється у вигляді теплоємності, геометричної ємності резервуара, інерційності й ін. Наприклад, ємність бака з водою залежить від його розмірів. Чим більший бак, тим повільніше буде змінюватися рівень при порушенні відповідності між надходженням води і її витратами. Особливістю більшості об'єктів управління є їхня багатоемність (наявність каскадів чи ланок технологічних об'єктів). Багатоемність призводить до підвищення порядку диференціального рівняння об'єкта, тобто до появи багатьох достатньо малих постійних часу об'єкта.

Керування – це формування керуючої дії за певним законом, який забезпечує необхідний режим роботи ОК. *Автоматичне керування* – керування, яке здійснюється без безпосередньої участі людини.

Частковим випадком вживання поняття «керування» є поняття «регулювання». Задача регулювання полягає в доведенні вихідної величини об'єкта регулювання до заздалегідь визначеного значення і підтримання її на заданому значенні з урахуванням збурювальних дій.

Для забезпечення підтримання заданого значення регульованої величини чи автоматичної зміни її за заданим законом використовуються *регулятори*.

При розгляді автоматичних систем важливими є поняття: «*вхід*», «*вихід*», «*дія*» (задавальна, збурювальна, вихідна), «*зворотний зв'язок*».

Вхід – це частина автоматичної системи або її пристрою, блока, ланки, на яку безпосередньо подається зовнішня дія.

Вихід – частина автоматичної системи або її пристрою, блока, ланки, яка діє безпосередньо назовні.

Задавальна дія – дія на систему, яка визначає необхідний закон зміни регульованої величини.

Збурювальна дія – дія, яка намагається порушити функціональний зв'язок між задавальною дією і регульованою величиною.

Вихідна дія – дія, яка видається на виході системи керування чи пристрою регулювання.

Додатковий зв'язок в структурній схемі САК у напрямку від виходу до входу називається *зворотним зв'язком*. Розрізняють зворотні зв'язки: додатні і від'ємні, головні і місцеві, жорсткі і гнучкі. Якщо зворотний зв'язок визначається алгебраїчною сумою задавального сигналу і сигналу зворотного зв'язку, то такий зв'язок називається *додатним*, а різницею – *від'ємним*.

Зворотний зв'язок, який утворюється регулятором стосовно об'єкта керування, називається *головним*.

Зворотні зв'язки, які можуть бути в самому регуляторі, називаються *місцевими*.

Для стабілізації систем чи для створення в них більш легких режимів перехідних процесів в коректуючих пристроях використовуються зворотні зв'язки, які в цьому випадку поділяють на жорсткі і гнучкі.

Суть *гнучкого* зворотного зв'язку полягає в тому, що він діє лише під час перехідного процесу і повністю усувається в усталеному режимі. Якщо зворотний зв'язок діє не лише в перехідному режимі, а й в усталеному, то такий зворотний зв'язок називається *жорстким*. Слід відзначити, що поняття гнучкого чи жорсткого зворотного зв'язку пов'язано з тією величиною, яка приймається як вихідна. Так, наприклад, зворотний зв'язок може бути гнучким до кута повороту вала двигуна і жорстким щодо швидкості його обертання.

Для визначення динамічних властивостей автоматичної системи необхідно мати її математичний опис, тобто математичну модель системи. В теорії автоматичного керування елементи автоматичних систем для вивчення їхніх динамічних властивостей подають у вигляді елементарних динамічних ланок. Під *елементарною динамічною ланкою* розуміють математичну модель частини системи чи функціонального елемента автоматики, яка характеризується математичним чи графічним описом процесу. Однією елементарною ланкою можуть бути представлено декілька елементів системи чи навпаки – один елемент може бути представлений у вигляді декількох ланок.

Задачі керування складними системами суттєво ускладнюються впливом багатьох випадкових факторів. В таких випадках керування повинно здійснюватись в умовах неповної інформації про об'єкт керування. Ці задачі вирішуються методами математичного моделювання на ЕОМ з використанням пакетів прикладних програм.

1.3. Класифікація систем автоматичного регулювання

Загальна класифікація систем автоматичного регулювання (САР) наведена в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2. Класифікація систем автоматичного регулювання

Класифікація САР	Коротка характеристика САР	
1. За алгоритмом функціонування	Стабілізуюча	Підтримує регульовану величину на постійному рівні
	Програмна	Змінює регульовану величину відповідно до заздалегідь заданої функції часу
	Слідкувальна	Змінює регульовану величину залежно від значення змінної величини на виході
2. За наявністю помилки	Статичні	Регульована величина при зміні зовнішніх збурень на об'єкті після закінчення перехідного процесу приймає різні значення, які залежать від величини впливу
	Астатичні	Регульована величина при зміні зовнішніх збурень після закінчення перехідного процесу набуває усталеного значення при різних величинах зовнішніх збурень