

## ВСТУП

У створеному людиною світі машин, що швидко розвивається, росте кількість та складність пристроїв, які виконують функції керування. Керування являє собою таку сукупність дій на якій-небудь процес або об'єкт, що забезпечує досягнення поставленої мети. Керування машинами, технічними системами та технологічними процесами без безпосередньої участі людини називається автоматичним. "Теорія автоматичного керування" – це наука, яка вивчає методи проектування систем автоматичного керування (САК), до складу яких звичайно входять об'єкт керування та керівний пристрій (автоматичний регулятор). Весь процес проектування можна поділити на декілька характерних етапів:

- 1) складання математичної моделі об'єкта керування (ОК);
- 2) вибір обладнання незмінної частини автоматичного регулятора (АР): вимірювальних, виконавчих та підсилюючо-перетворюючих пристроїв;
- 3) аналіз САК;
- 4) вибір засобів або алгоритмів корекції незмінної частини АР, виходячи із заданих вимог до показників якості САК;
- 5) синтез САК;
- 6) математичне моделювання САК.

Хоча окремі автоматичні регулятори з'явилися ще в стародавньому світі, вони були лише цікавими епізодами в історії техніки і не впливали на формування теорії автоматичного керування. Бурхливий розвиток автоматичного керування почався в XVIII-XIX століттях, в епоху промислової революції в Європі.

Початок наукового погляду на процес автоматичного керування поклали три праці: Дж. Максвелла «Про регулятори» (1866 р.) та дві роботи І.О. Вишнеградського «Про загальну теорію регуляторів» (1876 р.) та «Про регулятори прямої дії» (1877 р.).

Теорія автоматичного керування з моменту свого народження стимулювала спеціальні математичні дослідження. За рекомендацією Дж. Максвелла англійський математик Є. Раус в 1877 р. році розробив алгоритм, який зв'язав коефіцієнти характеристичного рівняння із стійкістю системи.

За ініціативою словацького інженера і вченого, фахівця в області парових та гідравлічних турбін А. Стодоли професор математики Цюрихського вищого політехнічного училища А. Гурвіц в 1895 р. році розробив алгебраїчний критерій стійкості систем у формі визначників. Значний внесок в теорію був зроблений М.Є. Жуковським, автором праці «Про стійкість руху» та одного з перших підручників "Теорія регулювання руху машин" (1909 р.). Він зробив математичний опис процесів у довгих трубопроводах, розглянув вплив сухого тертя в регуляторах, дослідив деякі процеси імпульсного регулювання за допомогою рівнянь в скінчених різницях.

До початку ХХ століття та в перші його десятиріччя теорія автоматичного керування сформувалася як самостійна наука з рядом прикладних розділів, таких як регулювання електричних машин та систем, регулювання двигунів, теплових та паросилових устаткувань, парових турбін, різних технологічних процесів та інших.

Ускладнення систем, пов'язане з підвищенням інтенсивності процесів, швидкостей, вимог до точності та якості, призводить до необхідності створення більш ефективних методів дослідження. Дослідники звертаються до частотних методів, які дозволяють поєднувати аналітичні та наочні графічні способи, теоретичні та експериментальні підходи. З'являються праці: американського вченого Х. Найквіста (1932 р.), в якій запропоновано критерій стійкості радіотехнічних підсилювачів із зворотним зв'язком, заснований на властивостях частотної характеристики розімкнутої системи, та О.В. Михайлова «Гармонічний метод в теорії регулювання» (1938 р.), в якій обґрунтовувалась доцільність використання частотних методів в теорії регулювання та був запропонований новий частотний критерій (критерій Михайлова) стійкості замкнутої системи САК.

Методи Найквіста та Михайлова отримали широке поширення в післявоєнні роки. В 1946 р. Г. Боде та Л. Мак-Кол ввели логарифмічні частотні характеристики. Г. Браун, А. Холл, Д. Кемпбел, Г. Честнат, В.А. Бесекерський, В.В. Солодовніков завершили розробку частотних методів аналізу та синтезу систем, надали їм форму, зручну для інженерних розрахунків.

Працями Г.В. Щіпанова, В.С. Кулібакіна, Б.М. Петрова, О.І. Кухтенка та інших розроблена теорія автоматичного керування за збуренням, теорія компенсацій та теорія інваріантності.

## **1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ. КЛАСИФІКАЦІЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ**

### **1.1. Основні поняття теорії автоматичного керування**

Об'єкт керування Control object	Об'єкт, для досягнення бажаних результатів функціонування якого необхідні та допустимі спеціально організовані дії.
Мета керування Control aim	Значення, співвідношення значень координат процесів в об'єкті керування або їх зміна з часом, при яких забезпечується досягнення бажаних результатів функціонування об'єкта.
Керуюча дія Controlling action	Дія на об'єкт керування, що призначена для досягнення мети керування.
Керування Control	Процес вироблення та здійснення керуючих дій.
Закон керування Control action; Control law	Математична форма перетворень задавальних дій, збурень, дій зворотних зв'язків, які визначають керуючі дії.
Алгоритм керування Control algorithm	Алгоритм, який визначає керування в реальному часі.

Якість керування Control performance	Сукупність характеристик керування, що прийнята для оцінки корисності керування.
Показник якості Control performance index	Кількісна оцінка якості керування.
Вхідна дія Input action	Дія, що подається на вхід системи керування або окремого її елемента (підсистему).
Зовнішня дія External action	Дія зовнішнього середовища на систему керування або її елемент (підсистему).
Дія уставки Set-point action	Задаюча дія, значення якої представляє задані значення керованої координати.
Дія відхилення Deviation action	Дія, значення якої відображає невідповідність значень керованої координати значенням дії уставки.
Типова дія Specified action; standard action	Дія, прийнята для оцінки та порівняння властивостей систем керування та їх елементів (одиничний стрибок, одиничний імпульс тощо).
Керуючий об'єкт Controlling objekt	Об'єкт, призначений для здійснення керування.
Система керування Control system	Система, яка складається з об'єкта керування та керуючого об'єкта.
Керуюча координата Controlling coordinate	Координата керуючої дії.

Керована координата Controlled coordinate	Координата об'єкта керування, значення якої залежать від керуючих дій та показують ступінь досягнення мети керування.
Збурення Disturbance	Дія ззовні на будь-який елемент (підсистему) системи керування, включаючи об'єкт керування, що заважає, як правило, досягненню мети керування.
Задаюча дія Setting action	Дія на керуючий об'єкт, що призначена для зміни мети керування.
Зворотний зв'язок Feedback	Залежність змінних дій на об'єкт від його стану, обумовленого попередніми діями на цей же об'єкт.
Регулювання Control	Керування, мета якого полягає в забезпеченні близькості поточних значень однієї або декількох координат об'єкта керування до їх заданих значень.
Стабілізація Stabilization; stabilizing control	Регулювання, мета якого полягає в забезпеченні постійності значень керованих координат на заданому інтервалі часу.
Слідкуюче регулювання Follow-up control	Регулювання, мета якого полягає в забезпеченні відповідності значень керованих координат значенням дій (сигналів) уставки, що змінюються за задалегідь невідомим способом.
Програмне регулювання Program control	Регулювання, мета якого полягає в забезпеченні відповідності значень керованих координат значенням дій (сигналів) уставки, що змінюються за задалегідь відомим способом.

Оптимальне керування Optimal control	Керування, мета якого полягає в забезпеченні екстремального значення показника якості керування.
Екстремальне керування Extremal control	Керування, мета якого полягає в досягненні та утриманні екстремуму заданого показника якості функціонування об'єкта керування.
Термінальне керування Terminal control; steady-state control	Керування, мета якого полягає в переведенні об'єкта керування в заданий кінцевий стан в заданий момент часу.
Фінітне керування Fixed-time control	Керування, мета якого полягає в переведенні об'єкта керування із заданого початкового стану в заданий кінцевий стан за обмежений час.
Ручне керування Manual control	Керування, при якому керівні дії виробляються і (або) здійснюються за безпосередньою участю людини-оператора.
Автоматичне керування Automatic control	Керування, при якому керуючі дії виробляються та здійснюються без безпосередньої участі людини-оператора.
Автоматизоване керування Automated control	Керування, що є поєднанням ручного та автоматичного керування.
Керування із зворотним зв'язком Feedback control	Керування, при якому поточні керівні дії виробляються з врахуванням стану об'єкта керування, обумовленого попередніми керівними діями.

Керування за відхиленнями Deviation control	Керування із зворотним зв'язком, при якому керівні дії виробляються тільки за значеннями дій (сигналів) відхилень.
Керування без зворотного зв'язку Feedbackless control	Керування, при якому поточні керівні дії виробляються без урахування результатів попередніх керуючих дій.
Керування за збуреннями Disturbance control	Керування, при якому керівні дії виробляються тільки за значеннями збурень (сигналів збурень) на об'єкт керування та значеннями задавальних дій (задавальних сигналів).
Комбіноване керування Combined control	Керування, що є поєднанням керувань за відхиленнями та за збуреннями.
Адаптивне керування Adaptive control	Керування, при якому керівні дії виробляються при заздалегідь невідомих або змінюваних в процесі експлуатації властивостях системи керування.
Програмне керування Programmed control	Керування, при якому значення керуючих координат та (або) керованих координат змінюються у відповідності до заданої програми.
Регулятор Controller	Керівний пристрій, що здійснює автоматичне керування шляхом апаратної реалізації алгоритмів керування.
Контролер Programmable Controller	Керівний пристрій, що здійснює автоматичне керування шляхом програмної реалізації алгоритмів керування.

## 1.2. Система автоматичного керування

Як уже відзначалось, система автоматичного керування (САК) представляє собою сукупність об'єкта керування (ОК) та керуючого об'єкта (КО). Основні компоненти САК та зв'язки між ними показані на рис. 1.1.

До складу КО звичайно входять: вимірювальні елементи (ВЕ) та виконавчий пристрій (ВП). Між ВЕ та ВП знаходяться так звані проміжні пристрої (ПП): підсилювачі напруги та потужності, перетворювачі, спеціальні технічні засоби тощо.

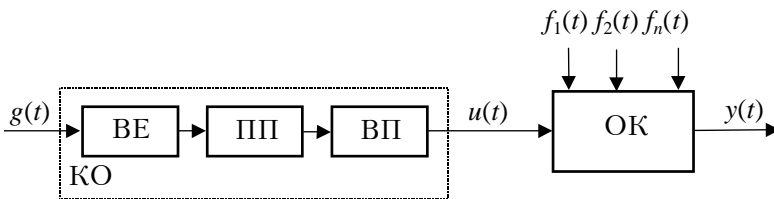


Рис. 1.1. Основні компоненти САК та зв'язки між ними

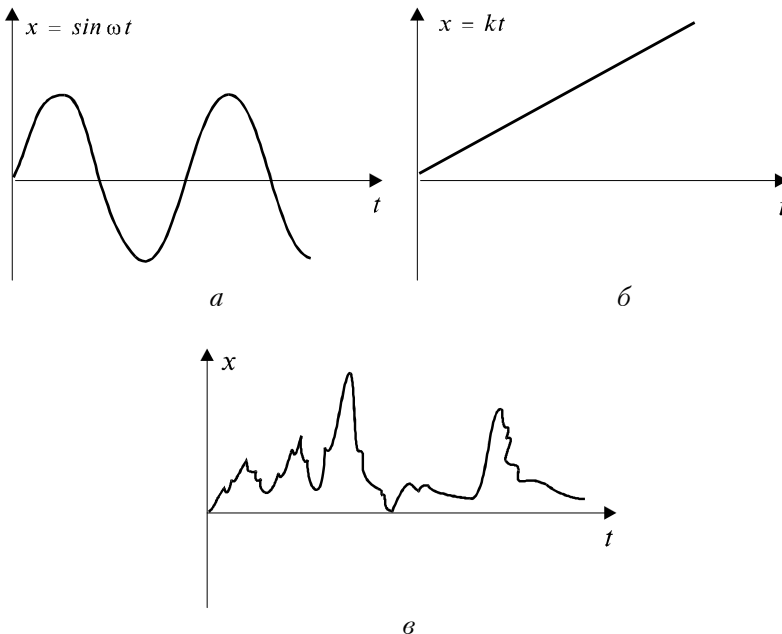


Рис. 1.2. Види дій



Фізична величина (переміщення, швидкість, тиск, температура тощо), що підлягає керуванню, називається керованою координатою  $y(t)$ . Керівна дія  $u(t)$  виробляється автоматичним керівним пристроєм (регулятором, контролером) для цілеспрямованої дії; збурення  $f_1(t), f_2(t), \dots$ , навпаки, викликають небажані, часто непередбачені відхилення керованої координати. Задаюча дія  $g(t)$  – це заздалегідь передбачена дія (програма).

Дії можуть бути регулярними (детермінованими) та випадковими. Регулярними називаються дії, які змінюються за відомими, певними законами (рис. 1.2, а та рис. 1.2, б), вони можуть бути точно передбачені для будь-якого майбутнього моменту часу. Випадкові дії (рис. 1.2, в) можуть бути охарактеризовані лише середніми за часом або за множиною (статистичними) параметрами.

### 1.3. Принципи керування

За принципом керування САК поділяються на:  
розімкнуті – без контролю керованої координати;  
замкнуті – з контролем керованої координати;  
комбіновані – системи, в яких одночасно реалізується розімкнутий та замкнутий принципи керування.

В розімкнутих САК може бути реалізовано керування за задаючою дією  $g(t)$  або керування за одним або декількома збуреннями  $f_i, i = 1, 2, \dots$  (рис. 1.3).

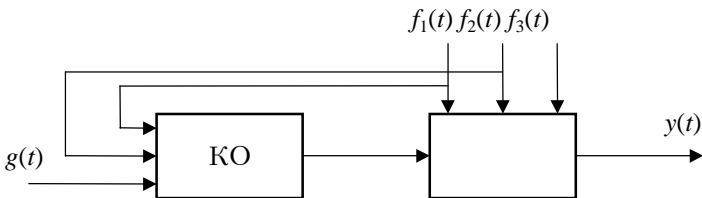


Рис. 1.3. Узагальнена функціональна схема розімкнутої САК

В таких САК в процесі роботи не контролюється фактична зміна керованої координати. Робота всіх елементів послідовного

тракту такої САК повинна бути жорстко та однозначно пов'язана із задаючою дією, і система повинна володіти властивістю однонаправленої дії.

Жорстким і однозначним називається такий зв'язок двох змінних, де при будь-якому значенні однієї змінної відповідає тільки одне, строго пропорційне значення іншої. Жорсткі та однозначні зв'язки відносяться до так званих позиційних зв'язків, тому розімкнуті системи програмного керування інколи називають позиційними автоматичними системами.

Таким чином, розімкнутими автоматичними системами керування за задавальною дією називаються системи, в яких робота всіх елементів однонаправленого розімкнутого ланцюга жорстко та однозначно пов'язана із задавальною дією та керована координата не контролюється.

Зв'язок між задаючою та керуючою дією виражається залежністю

$$u(t) = kg(t), \quad (1.1)$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності.

Оскільки в розімкнутих САК за задавальною дією керована координата не контролюється, то вони працюють з достатньою точністю лише за умови, що жорсткість та однозначність зв'язків в усіх елементах розімкнутого ланцюга не порушені, а збурення незначні за величиною.

Позитивною властивістю розімкнутих систем керування за задаючою дією є їх висока швидкодія.

Зменшення впливу збурень на керовану координату можна здійснити шляхом автоматичного керування за збуренням. Для збільшення точності роботи розімкнутих САК необхідно компенсувати вплив на керовану координату великої кількості збурень. Але навіть компенсація впливу збурення викликає певні труднощі із-за технічної складності його точного виміру. Тому низька точність роботи систем, в яких реалізується керування за збуренням, є їх істотним недоліком. Принцип розімкнутого керування не може бути використаним для усунення впливу так званих внутрішніх збурень, його не можна застосовувати при керуванні також нестійкими об'єктами.

Основні недоліки розімкнених систем керування зумовлені тим, що керована координата не контролюється. Щоб ефективно керувати, необхідно контролювати виконання наказу, що задає дію, і у випадку відхилень добиватися правильного виконання цього наказу. Для здійснення подібного принципу керування застосовують так званий від'ємний зворотний зв'язок.

Зв'язок керованої координати із задаючою дією, обумовлений їх неперервним порівнянням, в результаті якого виробляється протидія будь-яким збуренням та забезпечується слідкування керованою координатою за змінами задаючої дії, називається від'ємним зворотним зв'язком. Різницю при цих порівняннях називають помилкою або відхиленням керованої координати від задаючої дії. В САК з від'ємним зворотним зв'язком здійснюється принцип керування за помилкою або за відхиленням, відомий як принцип Ползунова–Уатта.

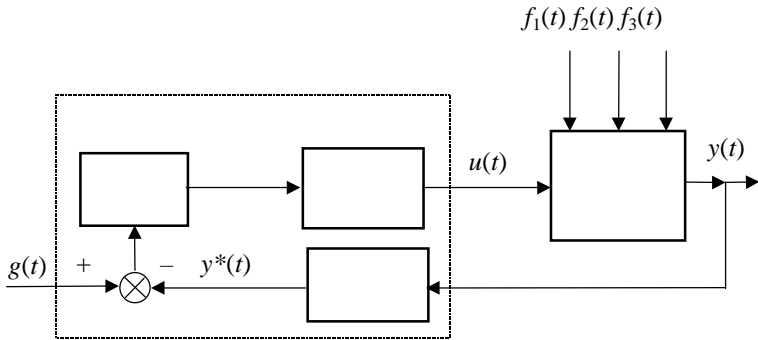
Автоматичні системи з від'ємними зворотними зв'язками називаються замкнутими системами автоматичного керування (регулювання) за відхиленням.

Узагальнені функціональні схеми замкнутих САК зображені на рис. 1.4. Вимірювально-перетворюючий елемент ВПЕ (рис. 1.4, *а*) вимірює та перетворює керовану координату  $y(t)$  в пропорційну їй величину  $y^*(t) = ky(t)$  іншої фізичної природи, однакової із задаючою дією. Елемент порівняння ЕП виробляє помилку  $x(t) = g(t) - y^*(t)$ . Якщо задаюча дія  $g(t)$  та керована координата  $y(t)$  мають однакову фізичну природу, то елемент порівняння одночасно є вимірювальним елементом (рис. 1.8, *б*). В цьому випадку елемент порівняння називають чутливим елементом (ЧЕ), який «відчуває» відхилення керованої координати від задавальних значень.

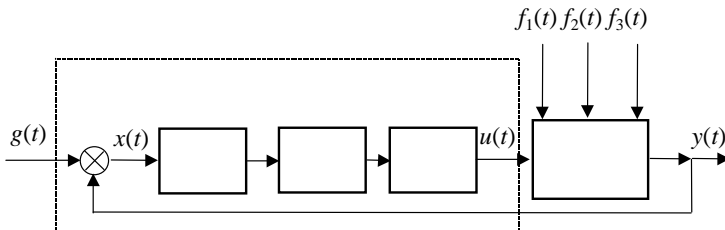
Необхідно підкреслити, що на вході будь-якого керуючого пристрою (КП) замкнутої САК повинні бути елементи (датчики, первинні перетворювачі), що виконують функції вимірювання та порівняння, а якщо необхідно, то і перетворення фізичних величин однієї природи в іншу (ПП – перетворювальні пристрої).

Позитивною властивістю замкнутих САК в порівнянні з розімкнутими є їх більш висока точність.

До недоліків замкнутих САК належить віднести їх схильність до коливань, до самозбудження через присутність замкнутого контуру, а також менша швидкодія.



*а) задаюча дія  $g(t)$  та керована координата  $y(t)$  різної фізичної природи*



*б) задаюча дія  $g(t)$  та керована координата  $y(t)$  однакової фізичної природи*

*Рис. 1.4. Узагальнені функціональні схеми замкнутих систем автоматичного керування*

В комбінованих САК робиться спроба використати позитивні властивості розімкнутого та замкнутого принципів керування та ліквідувати їх недоліки. Узагальнена функціональна схема комбінованої системи керування показана на рис. 1.5.

Зв'язок між вхідними та керуючими діями в комбінованій САК можна описати залежністю:

$$u(t) = \psi[x(t)] + \mu[g(t)] + \sum_{k=1}^m \varphi_k[f_k(t)], \quad (1.2)$$

$$x(t) = g(t) - y(t),$$

де  $\psi[x(t)]$ ,  $\mu[g(t)]$ ,  $\varphi_k[f_k(t)]$  – деякі задані функції від похибки  $x(t)$ , задаючої дії  $g(t)$  та збурень  $f_k(t)$  відповідно.

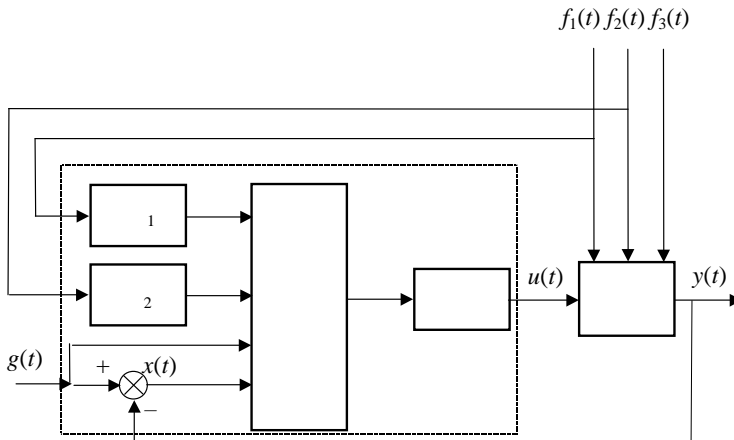


Рис. 1.5. Узагальнена функціональна схема комбінованої САК

Варто відмітити, що характер зв'язків розімкнутого кола за задаючою дією  $\mu[g(t)]$  в комбінованій САК самостійного значення не має. Якщо розірвати зворотний зв'язок і залишити лише одне коло розімкнутого керування за задаючою дією, то цілеспрямованого автоматичного керування об'єктом не вийде. Коло розімкнутого керування за задаючою дією служить лише для поліпшення якості роботи комбінованої САК.

#### 1.4. Види систем автоматичного керування

В залежності від характеру вхідної дії системи автоматичного керування поділяються на стабілізуючі, програмні та слідкуючі.

САК, алгоритм функціонування якої містить завдання підтримувати керовану координату постійною при збуреннях, що

довільно змінюються, називається автоматичною системою стабілізації (від латинського слова *stabilis* – стійкий).

САК стає системою стабілізації, якщо задаюча дія  $g(t)$  – постійна величина, тобто:

$$g(t) = g_0 = \text{const}. \quad (1.3)$$

САК, алгоритм функціонування якої містить завдання змінювати керовану координату у відповідності до завчасно заданої функції (закону), називається автоматичною системою програмного керування.

Автоматична система стає системою програмного керування, якщо змінювати задаючу дію  $g(t)$  за завчасно відомим законом, за програмою:

$$g(t) = g_n(t), \quad (1.4)$$

де  $g_n(t)$  – відома функція часу.

САК, алгоритм функціонування якої містить завдання змінювати керовану координату в залежності від невідомої завчасно випадкової функції, називається слідкуючою автоматичною системою або просто слідкуючою системою.

Автоматична система є слідкуючою, якщо задаюча дія  $g(t)$  змінюється за завчасно невідомим випадковим законом:

$$g(t) = g(t), \quad (1.5)$$

де  $g(t)$  – випадкова функція часу.

В так званих автоматичних системах прямого регулювання відсутні пристрої, які підсилюють за потужністю сигнали вимірювальних або чутливих елементів. Системою прямого керування (регулювання) називається така система, у якої вимірювальний елемент безпосередньо зв'язаний з регулюючим органом. Потужність вимірювального елемента в системах прямого регулювання повинна бути достатньою для переміщення регулюючого органу. Це призводить до збільшення ваги та габаритів вимірювального елемента, а тим самим звичайно знижується його чутливість та точність роботи.

Системами непрямого регулювання називаються такі системи, у яких вимірювальний елемент діє на виконавчий орган регулятора (заслінку, кермо тощо) не безпосередньо, а через активні пристрої, що містять джерела енергії або використовують для своєї роботи енергію сторонніх джерел (підсилювачі, двигуни, генератори тощо). Потужність вихідного

сигналу активних ланок завжди більша за потужність вхідного сигналу.

Ланки, що не містять джерел енергії та не використовують для своєї роботи енергію сторонніх джерел, називаються пасивними (системи важелів, електричні кола із резисторів, конденсаторів та котушок індуктивності, редуктори тощо).

Теорія автоматичного керування – це наука, яка має справу з так званими математичними моделями – різного роду рівняннями, які описують процеси керування в системах.

Всі існуючі типи рівнянь можна поділити на два класи: нелінійні та лінійні. У відповідності до цього і САК поділяють на лінійні та нелінійні.

Лінійними називаються системи, динаміка всіх ланок яких описується лінійними рівняннями (алгебраїчними, диференційними або різницевими). Лінійні системи, в свою чергу, поділяються на звичайні та особливі.

Звичайними лінійними системами називаються такі системи, динаміка всіх ланок яких описується звичайними лінійними диференційними та алгебраїчними рівняннями з постійними коефіцієнтами. Параметри звичайних САК постійні за часом і зосереджені в просторі (індуктивність котушки, опір резистора, маса маховика тощо).

До особливих належать, наприклад, наступні лінійні системи:

1. Системи зі змінними параметрами або нестационарні системи, в яких хоча б одна ланка має змінні параметри (змінна маса ракети, момент інерції барабана зі стрічкою, що намотується тощо). Динаміка нестационарних систем описується лінійними диференціальними рівняннями зі змінними коефіцієнтами.

2. Системи з розподіленими параметрами, в яких хоча б одна ланка має розподілені в просторі параметри (розподілені індуктивність та ємність довгої лінії електропередач тощо). Динаміка таких систем описується лінійними диференціальними рівняннями в частинних похідних.

3. Системи із запізненням, в яких є хоча б одна ланка із запізненням за часом (трубопроводи, транспортери, довгі лінії передачі інформації тощо). Динаміка систем із запізненням

описується лінійними рівняннями з аргументом, що запізнюється.

4. Імпульсні системи з амплітудною модуляцією, в яких хоча б в одній з ланок неперервний сигнал перетворюється у послідовність рівновіддалених за часом імпульсів однакової тривалості, амплітуда яких несе інформацію про поточне значення неперервного сигналу. Процеси в імпульсних системах описуються різницевиими рівняннями.

Автоматичні системи, які містять хоча б одну нелінійну ланку, називаються нелінійними системами. Нелінійна ланка – це пристрій, динаміка якого описується нелінійним рівнянням. Нелінійними є рівняння, що містять змінні та їх похідні не в першому степені, або в них присутні добутки змінних та їх похідних, або будь-які інші нелінійні (наприклад, трансцендентні) зв'язки змінних та їх похідних. Оскільки статичні характеристики ланок відображають зв'язок між змінними на вході та виході ланок, то системи, що містять ланки з нелінійними статичними характеристиками, також відносяться до нелінійних систем.

За характером зміни сигналів в САК системи поділяються на неперервні та дискретні. В неперервних системах передається та перетворюється кожне миттєве значення сигналу; сигнал, що передається, у цьому випадку визначає закон модуляції фізичної величини, яка є постійною або гармонічно змінюється.

В дискретних системах здійснюється квантування сигналів або за рівнем (проводиться фіксація дискретних рівнів сигналу в довільні моменти часу (рис. 1.6, *a*)) – релейні системи, або за часом (фіксуються дискретні моменти часу, при яких рівні сигналу можуть приймати довільні значення (рис. 1.6, *б*)) – імпульсні системи, або одночасно і за рівнем, і за часом (рис. 1.6, *в*) – цифрові системи.

Екстремальне керування – керування, мета якого полягає в досягненні та утриманні екстремуму заданого показника якості функціонування об'єкту керування. В деяких випадках показник якості (ефективності) процесу може бути виражений в кожний момент часу функцією поточних координат системи, і керування можна вважати оптимальним, якщо воно забезпечує підтримку цього показника в точці екстремуму, наприклад, настройку радіоприймача на частоту передаючої станції за найбільшою



гучністю прийому або за найбільшою яскравістю світіння індикаторної лампочки. Екстремальне керування звичайно починають з пошуку; спочатку виконують невеликі пробні рухи в якомусь вибраному напрямку, потім аналізують реакцію системи на ці спроби і після цього за результатами аналізу виробляють керуючу дію, яка б наближала систему до екстремуму.

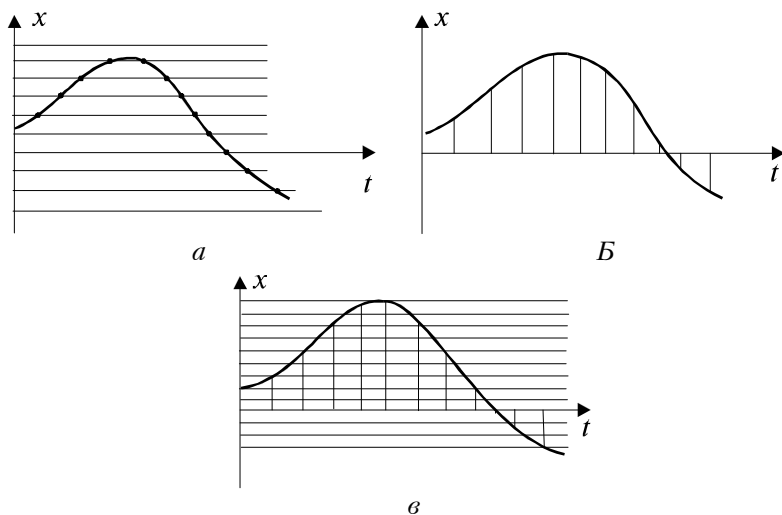


Рис. 1.16. Види квантування сигналів:

$a$  – за рівнем;  $б$  – за часом;  $в$  – одночасно за рівнем і за часом

Оптимальне керування – керування, мета якого полягає в забезпеченні екстремального значення показника якості керування. В керуванні динамічними технічними системами оптимізація часто суттєва для перехідних процесів, в яких показник ефективності залежить не тільки від поточних значень координат (як в екстремальному керуванні), але і від характеру зміни в минулому, теперішньому та майбутньому, і виражається деяким функціоналом від координат, їх похідних і, можливо, часу. Знаходження оптимального керування в таких динамічних задачах потребує вирішення в процесі керування достатньо складних математичних задач методами варіаційного числення або математичного програмування. Тому необхідною складовою

частиною системи оптимального керування стає електронно-обчислювальна машина.

Адаптивні системи. В реальних умовах зовнішні збурення можуть призводити до зміни не тільки координат, але й параметрів системи (коефіцієнтів рівнянь). Системи, які автоматично змінюють структуру та значення параметрів при непередбачених змінах зовнішніх умов на основі аналізу стану і (або) поведінки системи так, щоб зберігались задані показники якості її роботи, називаються адаптивними системами (від латинського *adaptio* – пристосування).

Адаптивні системи зі зміною значень параметрів інколи називають самонастроювальними, а системи зі зміною структури та алгоритму керування – самоорганізуючими.

Звичайно адаптивна система містить за «ядро» схему, що реалізує один з принципів керування, а контур адаптації прилаштовують до неї як вторинний, який здійснює корекцію параметрів.

## 1.5. Закони керування

Автоматичне керування яким-небудь процесом, наприклад, рухом літака, здійснюється впливом керуючого пристрою (регулятора) на певні органи керування (у випадку руху літака – руль висоти, елерони, рух напрямку, регулятор тяги). З точки зору динаміки, керуючий пристрій є сукупністю елементів, призначення яких полягає в перетворення інформації про параметри руху об'єкту та сигналів керування (від задаючого елемента) у відповідні відхилення органів керування.

Рівняння, яке зв'язує вихідну змінну керуючого пристрою  $u(t)$  з параметрами руху та сигналами керування, називається рівнянням керуючого пристрою. Наприклад, для керуючого пристрою поздовжнім рухом літака (автопілота) у загальному випадку можна записати:

$$D(p)u(t) = F(v, \theta, \alpha, V, H, u, g),$$

де  $p$  – оператор диференціювання ( $p = d/dt$ );  $D(p)$  – поліном;  $v, \theta, \alpha, V, H, u$  – параметри поздовжнього руху літака;  $g(t)$  – задаюча дія.

Якщо функція  $F$  є нелінійною, то регулятор називається нелінійним. У випадку лінійності, праву частину можна представити у вигляді суми:

$$D(p)u(t) = m_v(p)\Delta v + m_\theta(p)\Delta\theta + m_\alpha(p)\Delta\alpha + \\ + m_v(p)\Delta V + m_H(p)\Delta H + m_u(p)u(t) + m_g(p)g,$$

де  $m_i(p)$  – операторні многочлени, як правило не вище другого степеня.

Доданок  $m_u(p)u(t)$  зумовлений наявністю в керуючому пристрої зворотного зв'язку, який звичайно йде від виходу органу керування (виконавчого пристрою) до входу проміжного підсилювального елемента.

Диференційне рівняння  $D(p)u(t) = 0$  визначає власний рух керуючого пристрою, тобто многочлен  $D(p)$  характеризує власні динамічні властивості керуючого пристрою, зокрема динамічні похибки, які вносяться ним.

Права частина рівняння керуючого пристрою виражає так званий закон регулювання (керування). Законом керування (регулювання) називається залежність між вхідними та вихідними сигналами керуючого пристрою (регулятора) без урахування інерційності, тобто закон керування це рівняння «ідеального» регулятора. Закон регулювання створюється у обчислювальному пристрої і складається із сигналів, які поступають від вимірювальних та корегуючих пристроїв, зворотних зв'язків та задавачів режимів.

На практиці порядок полінома  $m_i(p)$  не перевищує другого, тобто:

$$m_i(p) = k_2 p^2 + k_1 p + k_0,$$

де  $k_0$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  – передаточні числа регулятора, так як вимірювання більш високих похідних від регульованих величин супроводжується, як правило, значними динамічними похибками, що не покращує якості системи керування. Крім того, введення вищих похідних підвищує чутливість системи до високочастотних збурень.

У окремих випадках у закон регулювання може бути введений сигнал, який залежить від інтеграла регульованої величини, так що в  $m_i(p)$  входить складова вигляду  $k_j/p$ .

Поліном  $m_g(p)$  визначається видом, місцем та способом введення керуючого сигналу  $g(t)$ .

Виходячи із власних динамічних властивостей, розрізняють два основних типи регуляторів: статичний і астатичний.

В статичному регуляторі кожному значенню вхідного сигналу відповідає одне визначене значення змінної  $u(t)$ . Особливістю оператора  $D(p)$  у такому випадку є наявність доданка, який не містить  $p$ . У задачах автоматичного керування технічними системами прийнято обмежуватися у виразі  $D(p)$  першим-другим степенем  $p$ , тому  $D(p)$  може мати один із наступних видів:

$$D(p) = Tp + 1;$$

$$D(p) = T^2 p^2 + 2\xi Tp + 1.$$

В астатичному регуляторі першого порядку не координата, а швидкість руху органу керування однозначно зв'язана з регульованими параметрами. В операторі  $D(p)$  відсутні складові, які містять  $p$  у степені нижчому, чим перший, тобто у випадку астатизму першого порядку маємо:

$$D(p) = p(Tp + 1);$$

$$D(p) = p(T^2 p^2 + 2\xi Tp + 1).$$

Постійні  $T$  та  $\xi$  характеризують динамічні похибки регулятора, які проявляються у запізненні та спотворенні вхідного сигналу в перехідному режимі. У цьому випадку, якщо вони дорівнюють нулю, керуючий пристрій називається ідеальним, і можна записати для ідеального статичного регулятора:

$$D(p) = 1,$$

для ідеального астатичного регулятора:

$$D(p) = p.$$

Вид полінома  $m_u(p)$  визначає тип зворотного зв'язку, який застосовується у керуючому пристрої. Зокрема, при  $m_u(p) = -k_u$  маємо жорсткий зворотний зв'язок, а при  $m_u(p) = -k_u p$  – гнучкий (швидкісний) зворотний зв'язок.

У випадку, коли передаточна функція фільтра в колі зворотного зв'язку має вид реальної диференціюючої ланки:

$$m_u(p) = -k_u \frac{T_i p}{1 + T_i p},$$

отримуємо керуючий пристрій з ізодромним зворотним зв'язком.

Розглянемо найбільш часто вживані закони регулювання.

1. Статичний керуючий пристрій з дією по керованій координаті (позиційний закон керування):

$$u(t) = k_\lambda \Delta \lambda. \quad (1.5)$$

2. Статистичний керуючий пристрій з впливом по координаті та швидкості зміни координати:

$$u(t) = k_\lambda \Delta \lambda + k_{\dot{\lambda}} \Delta \dot{\lambda}. \quad (1.6)$$

Позиційний сигнал  $\Delta \lambda$  забезпечує вибірковість системи по регульованому параметру та підвищує статичну стійкість її. Сигнал, пропорційний швидкості зміни регульованої координати  $\dot{\lambda}$ , вводиться для збільшення запасу стійкості системи та покращання якості перехідного процесу. Введення цього сигналу еквівалентне збільшенню власного демпфірування об'єкта керування.

3. Статичний керуючий пристрій з впливом по координаті, швидкості та прискоренню зміни координати:

$$u(t) = k_\lambda \Delta \lambda + k_{\dot{\lambda}} \Delta \dot{\lambda} + k_{\ddot{\lambda}} \Delta \ddot{\lambda}. \quad (1.7)$$

Введення сигналу, пропорційного прискоренню зміни керованої координати забезпечує в перехідному режимі створення штучного моменту інерції об'єкта керування. Такий сигнал зменшує початкові відхилення об'єкта керування від встановленого режиму руху, які викликаються швидко змінюваними зовнішніми збуреннями. Крім того, сигнал, пропорційний прискоренню, в деякій мірі компенсує динамічні похибки регулятора.

4. Астатичний керуючий пристрій:

$$u(t) = k_\lambda \Delta \lambda + k_{\dot{\lambda}} \Delta \dot{\lambda} + k_f \int_0^t \Delta \lambda d\tau. \quad (1.8)$$

Сигнал, пропорційний інтегралу від регульованого параметра, вводиться в закон регулювання для компенсації статичних похибок, які викликаються постійно діючими збуреннями.

Такий же ефект може бути отриманий в регуляторі зі швидкісним зворотним зв'язком при керуванні по координаті,

швидкості та прискоренню зміни координати, тобто при законі регулювання вигляду:

$$\dot{u}(t) = k_{z1}\Delta\lambda + k_{\dot{z}1}\Delta\dot{\lambda} + k_{\ddot{z}1}\Delta\ddot{\lambda}. \quad (1.9)$$

## 1.6. Контрольні запитання

1. Визначте поняття “система автоматичного керування”.
2. Які функціонально необхідні складові частини входять до складу системи автоматичного керування?
3. Наведіть оригінальні приклади систем автоматичного керування.
4. Наведіть ознаки, за якими САК поділяються на лінійні та нелінійні, стаціонарні та нестаціонарні.
5. Які основні принципи керування реалізуються в САК?
6. Наведіть основні особливості та позитивні властивості розімкнутих та замкнутих САК.
7. Які САК відносяться до особливих лінійних?
8. Що розуміють під законом керування (регулювання)?
9. Наведіть приклади статичних та астатичних законів керування.