

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія технічного обслуговування авіаційної техніки

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

**з навчальної дисципліни «Основи теорії автоматичного регулювання»
обов'язкових компонент освітньо-професійної програми
першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
Технічне обслуговування та ремонт повітряних суден і авіадвигунів**

за темою – Основні поняття теорії автоматичного регулювання як складової теорії автоматичного керування.

Харків 2021

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 23.09.2021 № 8

СХВАЛЕНО

Методичною радою Кременчуцького
льотного коледжу Харківського наці-
онального університету внутрішніх
справ
Протокол від 22.09.2021 № 2

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 22.09.2021 № 2

Розглянуто на засіданні циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки, протокол від 30.08.2021 № 1

Розробник: старший викладач циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки, к.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист, Владов С.І.

Рецензенти:

1. Доцент кафедри автомобілів і тракторів Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, кандидат технічних наук, доцент Павленко О.В.
2. Викладач циклової комісії аеронавігації Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Тягній В.Г.

План лекції

1. Предмет і завдання курсу.
2. Місце в системі наук.
3. Сутність автоматичного регулювання як складової теорії автоматичного керування автоматичного керування.
4. Основні визначення.
5. Цілі автоматичного регулювання.
6. Принципи автоматичного регулювання.
7. Вигляд впливів на САК.
8. Режим роботи САК.
9. Вимоги до САК.
10. Класифікація САК.
11. Узагальнена функціональна схема САК.
12. Приклади САК.

Рекомендована література:

Основна

1. Абраменко І. Г., Абраменко Д. І. Теорія автоматичного керування : навчальний посібник. Харків : ХНАМГ, 2008. 178 с.
2. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування : підручник ; 2-ге вид., перероб. і дор. Київ : Либідь, 2007. 656 с.
3. Сорока К. О. Теорія автоматичного керування : навчальний посібник. Харків : ХНАМГ, 2006. 187 с.

Допоміжна

4. Іванов А. О. Теорія автоматичного керування : підручник. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет. 2003. 250 с.
5. Гоголюк П. Ф., Гречин Т. М. Теорія автоматичного керування : навчальний посібник. Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2009. 280 с.
6. Асланян А. Е., Зіатдінов Ю. К., Барабаш О. В., Бельська О. А. Теорія автоматичного керування: підручник. Київ: Національний авіаційний університет, 2015. 532 с.

1.1. Предмет і завдання курсу

Теорія автоматичного керування (ТАК) – наукова дисципліна, *предметом вивчення якої є процеси, що відбуваються в системах автоматичного керування (САК).*

Завданнями курсу є:

- *вивчення функцій, які виконують у САК окремі пристрої і елементи;*
- *виявлення загальних закономірностей функціонування САК в цілому;*
- *розробка на основі цих закономірностей методів аналізу існуючих і синтезу нових САК.*

Вирішення цих завдань проводиться з використанням:

- *теорії диференціальних рівнянь;*
- *операційного вирахування (перетворення Лапласа);*
- *спектрального аналізу (перетворення Фур'є);*
- *математичного моделювання.*

1.2. Місце ТАК в системі наук

Формування ТАК в самостійну наукову дисципліну відбулося наприкінці 40-х років 20 ст. ТАК є теоретичною основою технічної кібернетики - напрямку кібернетики, що займається вивченням технічних систем. Сама ж кібернетика (у перекладі з грец. – мистецтво керування) є *наукою про керування, зв'язок і переробку інформації^{*)}*. Засновником кібернетики вважається американський математик Н. Вінер, який випустив у 1948 р. книгу, що так і називалася «Кібернетика».

Основними об'єктами дослідження в кібернетику є *кібернетичні системи (КС)*. Особливістю цих систем є те, що вони розглядаються абстракт-

^{*)} Інформація (лат. - пояснення, виклад) - відомості, повідомлення про навколишній світ

но, тобто безвідносно до їхньої реальної природи. Абстрактна КС представляється у вигляді сукупності взаємозалежних об'єктів - елементів системи, здатних запам'ятовувати й переробляти інформацію, а також обмінюватися нею з іншими елементами та із зовнішнім миром. Прикладами таких систем служать автоматичні регулятори (наприклад, автопілот), електронні обчислювальні машини (ЕОМ), людський мозок, біологічні популяції, людське суспільство.

Кібернетичний підхід до вивчення різних об'єктів полягає в тім, що вони розглядаються як перетворювачі інформації. Сигнали, що надходять на вхід системи, міняють її стан і ініціюють вихідні сигнали, які в загальному випадку залежать як від стану КС, ТАК і від вхідних сигналів.

КС при вивченні питань керування можна представити у вигляді двох взаємодіючих блоків - об'єкта керування і керуючої системи (див. рис. 1.1).

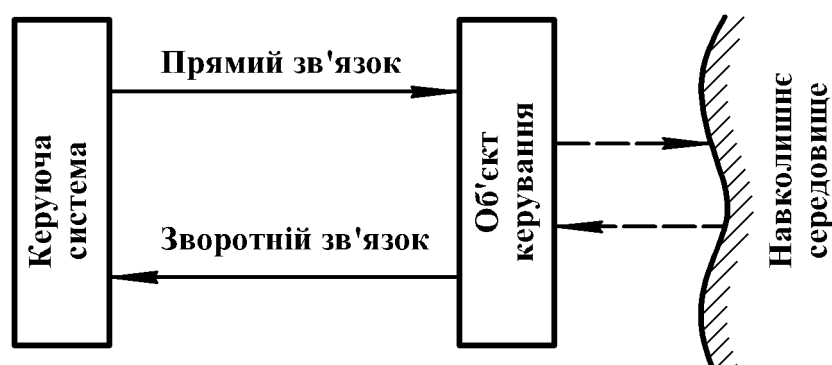


Рис. 1.1- Структура кібернетичної системи

Керуюча система по каналах прямого зв'язку передає керуючі впливи на об'єкт керування. Інформація про об'єкт керування по каналах зворотного зв'язку передається в керуючу систему (на рисунку пунктиром позначені можливі взаємодії об'єкта керування з навколишнім середовищем). Завданням керуючої системи є формування таких керуючих впливів, що забезпечують досягнення цілей керування.

Для дослідження КС у кібернетиці використовують три методи. Два з них - аналітичний та експериментальний - широко застосовуються і в інших

науках. Заслугою кібернетики є розробка і використання нового методу дослідження, проміжного між зазначеними двома, - методу *математичного моделювання*. Суть його полягає в тому, що експерименти проводяться не з реальною фізичною моделлю досліджуваного об'єкта, а з його описом, вміщеним у пам'ять ЕОМ.

Таким чином ЕОМ можна розглядати як універсальний перетворювач інформації. Це означає, що, запам'ятовуючи структуру будь-якої іншої КС, ЕОМ виявляється здатною виконувати її функції як перетворювача інформації.

Завдяки наявності нового методу дослідження і універсальності поняття КС кібернетика може використовуватися як інструмент дослідження в інших науках. Тому кібернетика подібна до математики, яка привносить в інші науки властивий їй математико-аналітичний метод дослідження.

1.3. Сутність автоматичного керування

У повсякденному житті ми досить часто зіштовхуємося з поняттям “керування”, під яким розуміється *процес приведення певного фізичного об'єкта в стан, що відповідає деякій меті*. Керувати можна транспортним засобом, верстатом, школою, телевізором, і т.п.

У наш час одним з найбільш прогресивних напрямків у загальному розвитку науки й техніки є заміна операцій людини в процесах керування функціонуванням певних технічних пристроїв, тобто *автоматизація* таких процесів. Це обумовлюється в першу чергу тим, що через фізіологічні й психологічні особливості людини-оператора ефективність процесів керування звичайно не може досягати можливих оптимальних значень.

При цьому все більшого значення набуває *автоматичне керування*, під яким мається на увазі здійснення *певних керуючих впливів на заданий об'єкт, необхідних і достатніх для його цілеспрямованого функціонування із заданою точністю без особистої участі людини*. Роль людини зводиться до

проектування, налагодження, запуску САК, епізодичному контролю за правильністю роботи, зупинці системи та інших побічних функцій, безпосередньо не пов'язаних з операціями керування.

Як приклад автоматичного керування розглянемо роботу одного з перших технічних пристроїв, керуючих об'єктом автоматично – *відцентрового регулятора для підтримки сталості ходу парової машини*, винайденого англійським механіком Джеймсом Уаттом в 1784 р, (див. рис. 1.2).

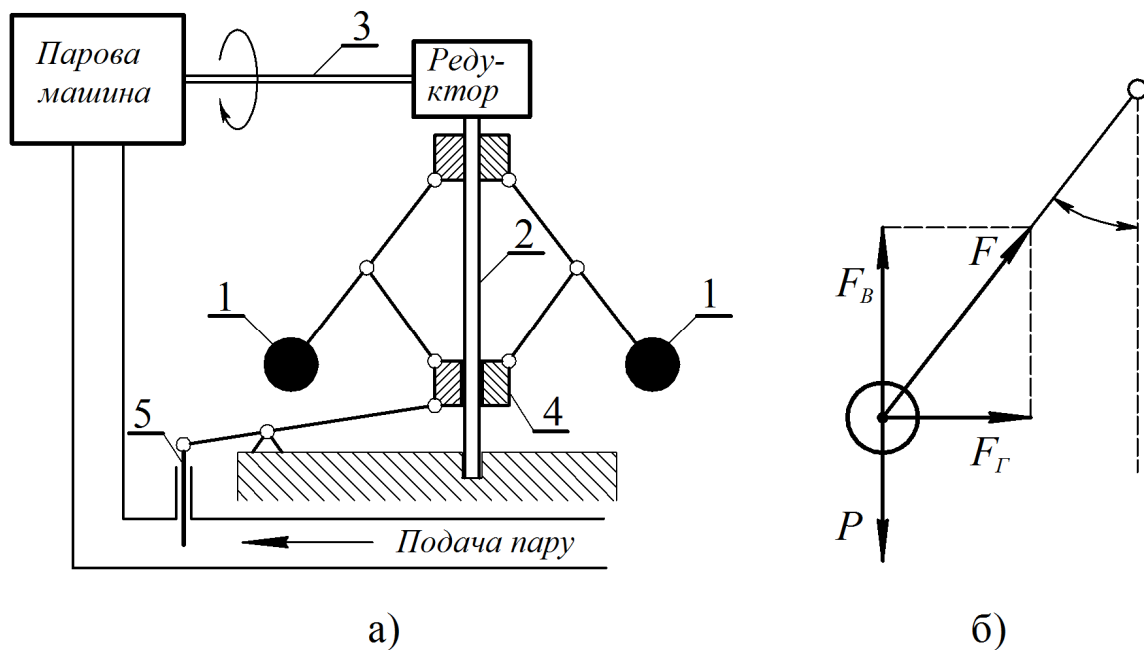


Рис. 1.2 - Регулятор Уатта:

а) принципова схема; б) схема діючих сил

Цей регулятор складається з двох вантажів 1, підвішених на шарнірах уздовж осі вертикального вала 2, зв'язаного через редуктор з вихідним валом парової машини 3. Важелі вантажів з'єднані із втулкою 4, що може переміщуватися уздовж вала 2. Втулка 4, у свою чергу, з'єднана важелем із заслінкою 5, положення якої визначає перетин отвору, через який пар надходить із казана в циліндр машини.

При пуску машини її вихідний вал 3 приходить в обертання з кутовою швидкістю ω , а кожний з вантажів починає зазнавати впливу двох сил (див. рисунок): сили пружності важеля F (або її вертикальної F_B і горизонталь-

ної F_r складових) і сили ваги P . Якщо величина ваги P , кут α і передаточне число редуктора підібрані такими, що при цьому $F_b > P$, то вантажі почнуть зміщуватися вгору і у сторони доти, поки не наступить стан динамічної рівноваги, коли $F_b = P$. У результаті цього заслінка 5 приймає деяке положення, що відповідає певній швидкості.

Застосування такого регулятора забезпечує з певною точністю сталість швидкості ω незалежно від величини навантаження на валу машини і параметрів робочого пару. Наприклад, якщо з якої-небудь причини машина збільшить швидкість обертання, то доцентрова сила F_r також збільшиться, що приведе до зростання F а отже і F_b . Стан рівноваги порушиться і вантажі почнуть підніматися вище, що приведе до більшого закриття заслінки, зменшення витрати пару і, отже, до зниження ω .

Парова машина не мала здатність стійко забезпечувати необхідний режим роботи, тобто не володіла «самовирівнюванням». Наявність підключеного регулятора теж іноді приводила до несподіваних результатів - машина починала «розгойдуватися». Це викликало необхідність проведення відповідних теоретичних досліджень. Особливо варто виділити три фундаментальні теоретичні роботи, що містили в собі, власне кажучи, виклад основ ТАК: робота Д.К. Максвелла «Про регулятори» (1866) і роботи І.А. Вишнеградського «Про загальну теорію регуляторів» (1876) і «Про регулятори прямої дії» (1877). Обоє авторів здійснили системний підхід до проблеми, розглянувши регулятор і машину як єдину динамічну систему. Математичний опис системи був спрощений шляхом переходу до дослідження малих коливань і лінеаризованих диференціальних рівнянь, що дозволило сформулювати загальний методологічний підхід до дослідження різномірних за фізикою і конструкцією систем, закласти основи теорії стійкості й установити ряд важливих загальних закономірностей регулювання за принципом зворотного зв'язку.

Роботи І.А. Вишнеградського містять крім цінних практичних рекомендацій також основи ряду сучасних методів дослідження стійкості і якості

регулювання (діаграми стійкості й розподілу коренів, виділення областей стійкості та монотонності та ін.). Саме І.А. Вишнеградський є основоположником теорії автоматичного регулювання.

Робота Д.К. Максвелла залишилася в той час непоміченою, тому що вона розглядала нехарактерний об'єкт, явно корисних практичних висновків не містила і рекомендувала практично непридатні для машин того часу астатичні регулятори. Її роль була оцінена пізніше, коли теорія автоматичного регулювання вже сформувалася в самостійну наукову дисципліну.

Теорія регулювання стала стимулювати розробки математичного плану. Е. Раус розробив алгоритм для оцінки розташування коренів характеристичного рівняння і стійкості, А. Гурвіц вивів алгебраїчний критерій стійкості.

Зміни САК, пов'язані з ускладненням структури і підвищенням вимог до швидкості протікання, точності і якості процесів, привели до необхідності створення більш ефективних методів дослідження систем. З'явилися частотні методи, що дозволяють сполучати аналітичні й наочні графічні прийоми, теоретичні й експериментальні методи дослідження. Х. Найквіст в 1932 р. запропонував критерій стійкості радіотехнічних підсилювачів зі зворотним зв'язком, заснований на властивостях частотної характеристики розімкнутої системи. У 1938 р. в роботі «Гармонійний метод у теорії регулювання» А.В. Михайлов обґрунтував доцільність використання частотних методів у теорії регулювання. У 1946 р. Г. Боде і Л. Мак Кіл ввели логарифмічні частотні характеристики. Р. Флойд для дослідження якості запропонував наближену розбивку речовинної частотної характеристики на трапеції. М. Браун, А. Хол, Д. Кемпбелл, Г. Честнат, А.В. Михайлов, В.В.Солодовников та ін. завершили розробку частотних методів синтезу й розрахунку систем, надавши їм сучасну форму, зручну для інженерних розрахунків, у тому числі при використанні сучасних комп'ютерних технологій.

Відзначимо, що термін “автоматичне керування” слід відрізняти від терміна “автоматизоване керування”, під яким розуміється керування з обов'язковою участю людини.

1.4. Основні визначення

Найбільш загальними, що лежать в основі всієї термінології ТАК, визначеннями є наступні: алгоритм, алгоритм функціонування, об'єкт керування, алгоритм керування, керування, автоматичний керуючий пристрій, система автоматичного керування.

Алгоритмом називають сукупність приписань, що встановлюють кінцеву послідовність точно певних дій, виконання яких приводить до кінцевого результату. У ТАК термін “алгоритм” використовують найчастіше у сполученні зі словами “функціонування” і “керування”.

Алгоритм функціонування – це сукупність правил, що ведуть до правильного виконання технічного процесу в якому-небудь пристрої або в сукупності пристроїв (системі). Наприклад, алгоритм функціонування генератора змінного струму, призначеного для перетворення теплової енергії в електричну, часто формулюється у вигляді: забезпечення сталості параметрів напруги U і частоти f , тобто $U = \text{const}$ і $f = \text{const}$.

У ТАК алгоритм функціонування вважається заданим.

Об'єкт керування (ОК) – це пристрій (або сукупність пристроїв), що здійснює технічний процес і потребує спеціально організованих впливів ззовні для забезпечення свого алгоритму функціонування.

Річ у тому, що на будь-який технічний пристрій завжди впливає зовнішнє середовище, причому цей вплив, як правило, має збурюючий характер, тобто середовище заважає правильному функціонуванню цього пристрою. У результаті відхилення від алгоритму функціонування можуть перевищувати припустимі межі.

Алгоритм керування – це сукупність приписань, що визначають характер впливів на ОК з метою забезпечення його алгоритму функціонування.

Керування - процес виконання впливів на ОК відповідно до алгоритму керування.

Автоматичний керуючий пристрій (АКП) – це пристрій, що здійснює без участі людини процес керування.

Система автоматичного керування (САК) – сукупність ОК і АКП, взаємодіючих між собою з метою забезпечення заданого алгоритму функціонування ОК. САК можна подати у вигляді схеми, наведеної на рис. 1.3.

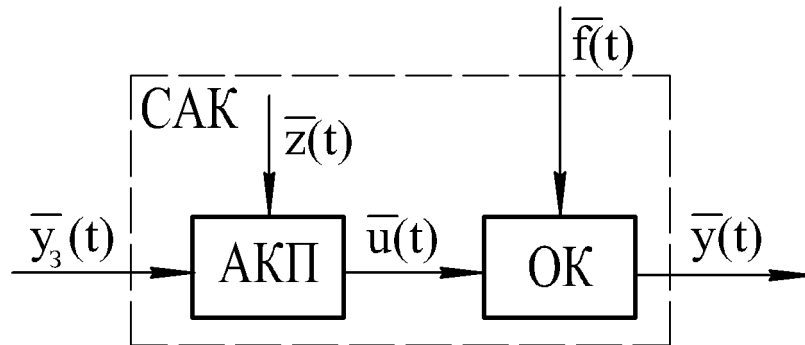


Рис.1.3- Структура САК

Розглянемо величини, присутні в цій схемі.

Величини $\bar{y}(t)$ на виході ОУ характеризують його стан і, отже, у процесі керування повинні цілеспрямовано змінюватися або підтримуватися постійними. Тому вони називаються *керованими величинами* або *керованими змінними*. Цими величинами можуть служити як певні фізичні параметри, що безпосередньо вимірюються (t^0, U, ω, φ і т.д.), так і величини, що обчислюються по декількох вимірюваних параметрах (К.К.Д., потужність).

Керовані величини залежать від *вхідних впливів* $\bar{X}(t)$. Останні розділяються на дві принципово різні групи: керуючі $\bar{u}(t)$ і збурюючі $\bar{f}(t)$ впливи.

Керуючі впливи виробляються в АКП відповідно до алгоритму керування на основі інформації про необхідні значення керованих величин $\bar{y}_3(t)$ і інформації про стан ОК - $\bar{z}(t)$, забезпечуючи бажане функціонування ОК.

Збурюючі впливи $\bar{f}(t)$, навпаки, заважають нормальному функціонуванню ОК і змінити їх, як правило, неможливо.

Величини $\bar{y}_3(t)$ служать для задання необхідних станів керованих змінних $\bar{y}(t)$ і називаються *задаючими впливами*.

Таким чином САК є динамічною системою спрямованої дії, що забезпечує певний функціональний зв'язок між задаючими впливами і керованими змінними при наявності певних збурюючих впливів, тобто

$$\bar{y}(t) = A[\bar{y}_3(t), \bar{f}(t)],$$

де A – оператор перетворення, що представляє собою сукупність математичних операцій, які необхідно виконати, щоб одержати $\bar{y}(t)$.

Надалі для простоти викладу обмежимося розглядом тільки одновимірних САК, у яких $y(t) = y_1(t)$ і $y_3(t) = y_3(t)$.

1.5. Цілі автоматичного керування

Залежно від характеру завдань можна виділити наступні узагальнені цілі функціонування САК: стабілізація, програмне керування і спостереження.

Під *стабілізацією* розуміється алгоритм функціонування, що забезпечує підтримку постійного значення керованої величини, тобто $y(t) \approx y_3(t) = \text{const}$. Знак \approx підкреслює той факт, що керована величина в реальних системах підтримується на заданому рівні з деякою помилкою. Прикладом такої системи є САК стабілізації частоти вихідної напруги генератора електростанції.

Програмне керування полягає в зміні керованої величини відповідно до заздалегідь відомого закону зміни задаючого впливу $y(t) \approx y_3(t) = y_{3, \text{пр}}(t) = \text{var}$. Прикладами таких САК є система числового програмного керування верстатом (функція часу) і система керування рухом ліфта (функція шляху).

Спостереження полягає в зміні керованої величини відповідно до заздалегідь невідомого закону зміни задаючого впливу $y(t) \approx y_3(t) = y_{3,сл}(t) = var i$. Такі системи звичайно використовують для дистанційного керування переміщенням об'єктів у просторі, або для дистанційної передачі показань приладів.

1.6. Принципи автоматичного керування

Під принципами керування в ТАК розуміють *способи формування керуючого впливу*. Для полегшення розуміння цих принципів розглянемо спочатку процес керування автомобілем. У цьому випадку водій бачить перед собою дорогу і об'єкти, що перебувають на ній, спостерігає, куди рухається автомобіль і на основі цього ухвалює рішення щодо керування ним. Проаналізувавши цей процес, можна виділити в ньому такі основні елементи:

- одержання інформації про напрямок, в якому повинен рухатися автомобіль;
- одержання інформації про те, куди фактично рухається автомобіль;
- аналіз отриманої інформації і прийняття на його основі рішення про необхідні керуючі дії;
- виконання ухваленого рішення.

Аналіз процесів керування в інших випадках також часто приводить до виділення аналогічних чотирьох *складених елементів*, які в узагальненому вигляді можна сформулювати так:

- одержання інформації про завдання керування;
- одержання інформації про фактичний стан ОК;
- аналіз отриманої інформації і виробіток рішення про необхідні керуючі дії;
- здійснення керуючих впливів.

Таким чином, у подібних системах визначення необхідних керуючих впливів залежить від результатів керування. Іншими словами, причина – ке-

руючий вплив – залежить від наслідку – викликуваного цим впливом поводження ОК. Такий зв'язок причини і наслідку називається *зворотним зв'язком*, а принцип керування, що використовує її, називається *принципом зворотного зв'язку або керуванням за відхиленням* (принцип Ползунова – Уатта). САК, що реалізує цей принцип, називають *замкнутою*. Її найбільш загальний вигляд наведений на рис. 1.4.

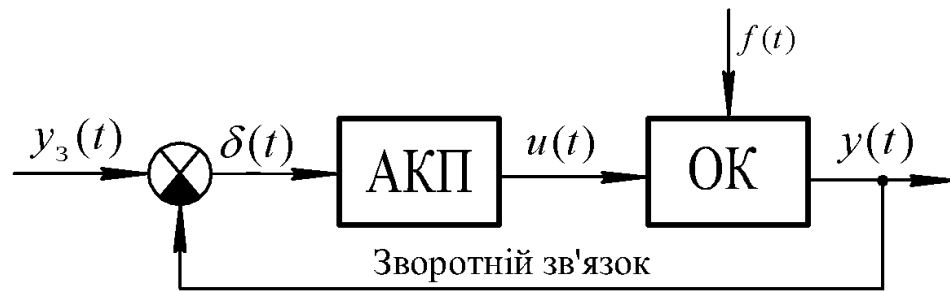


Рис. 1.4 – Структура САК при керуванні за відхиленням

У цих САК керуючий вплив визначається не безпосередньо за керованою величиною $y(t)$, а за величиною сигналу похибки $\delta(t) = y_3(t) - y(t)$, тобто $u(t) = A_{\pi}[\delta(t)]$,

де A_{π} - оператор перетворення (алгоритм керування).

Достоїнствами принципу є:

- облік при виробітку керуючого впливу всіх збурювань, що впливають на керовану величину;

- можливість здійснювати керування ОК в умовах деякої невизначеності (кількісної але, загалом кажучи, не будь-який і тим більше не якісної).

Недоліками принципу є:

- відносно низька швидкодія, що викликається тим, що компенсація системою дії збурювань починається тільки тоді, коли ці збурювання приводять до зміни керованої величини;

- наявність похибки керування в перехідному процесі;

- через наявність замкнутого ланцюга в таких системах можуть виникати коливання, які в ряді випадків роблять їх непрацездатними.

Іншим принципом керування є *принцип розімкнутого керування*, коли відсутній облік значень керованої величини. Реалізується він *розімкнутими САК*, які, у свою чергу, діляться на два класи:

- САК, що здійснюють керування за збурюючим впливом;
- САК, що здійснюють керування за задаючим впливом.

У першому випадку САК має вигляд, наведений на рис.1.5.

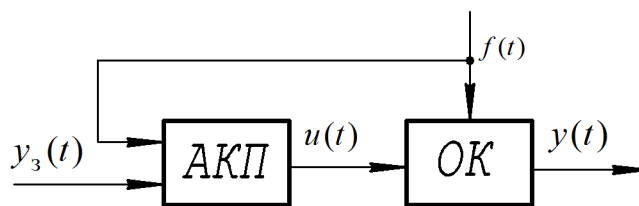


Рис. 1.5 - Схема САК при керуванні за збурюючим впливом

З рисунка видно, що в таких системах визначення керуючого впливу $u(t)$ здійснюється з урахуванням інформації про величину збуджуючого впливу $f(t)$, тобто

$$u(t) = A_n [y_3(t), f(t)].$$

Достоїнством такого керування є *висока швидкодія САК*, тому що система реагує на зміну збудження ще до того, як ці зміни викличуть зміни керованої величини.

Недоліками його є:

- *нечутливість САК до всіх збурюючих впливів, крім вимірюваного*, внаслідок чого точність керування може знижуватися до неприпустимих значень;

- *необхідність попереднього визначення точного кількісного закону взаємодії впливу, що збуджує, з керованою величиною*.

У другому випадку САК має вигляд, наведений на рис.1.6.

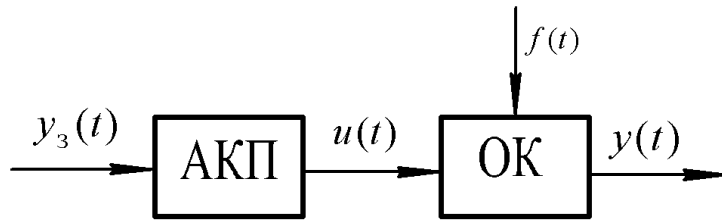


Рис. 1.6 - Схема САК при керуванні за задаючим впливом

Сутність такого керування полягає в тому, що керуючий вплив виробляється тільки на основі задаючого впливу, тобто

$$u(t) = A_{\pi} [y_3(t)].$$

Достоїнством принципу є простота реалізуючої його САК.

Недоліком же є те, що застосовувати його можна для керування тільки такими ОК, в яких керована величина практично не залежить від збурюючих впливів.

Відзначимо, що в одній САК можуть використовуватися одночасно як принцип зворотного зв'язку, так і принцип розімкнутого керування. Таке керування називають *комбінованим*.

У цьому разі

$$u(t) = A_{\pi} [\delta(t), f(t)].$$

Достоїнством його є висока швидкодія на зміни основних збурюючих впливів і висока точність керування, незалежно від того, яка причина викликала відхилення керованої величини.

1.7. Вигляд впливів на САК

САК в ході свого функціонування випробовують впливи двох виглядів: внутрішні й зовнішні.

Внутрішні впливи виникають у результаті взаємодії елементів САК між собою. Типовим прикладом такого впливу є дія АКП на ОК.

Зовнішні впливи виникають поза САК і можуть передаватися в систему як через ОК, так і через будь-який інший елемент системи. Цими впливами є задаючий і збурюючий впливи.

Очевидно, що залежно від величини і характеру зовнішніх впливів поведіння САК буде різним. У той же час ці впливи реально являють собою, найчастіше, випадкові функції часу. Тому дослідження функціонування конкретних САК роблять при декількох різних, чітко певних впливах, названих *типовими*. Ці впливи описуються простими математичними виразами і легко відтворюються при випробуванні систем. У результаті такого підходу стало можливим уніфікувати розрахунки різних систем, а також проводити порівняння їхніх властивостей.

Розглянемо ці впливи.

Східчастий вплив – вплив, що миттєво зростає від нуля до деякого значення і далі залишається постійним (див. рис. 1.7,а).

Аналітично східчастий вплив записується у вигляді:

$$x(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ a & \text{при } t \geq 0. \end{cases}$$

При цьому найбільш зручно використовувати вплив, у якого $a = 1$. Його називають *одиничним східчастим впливом* і позначають $1(t)$.

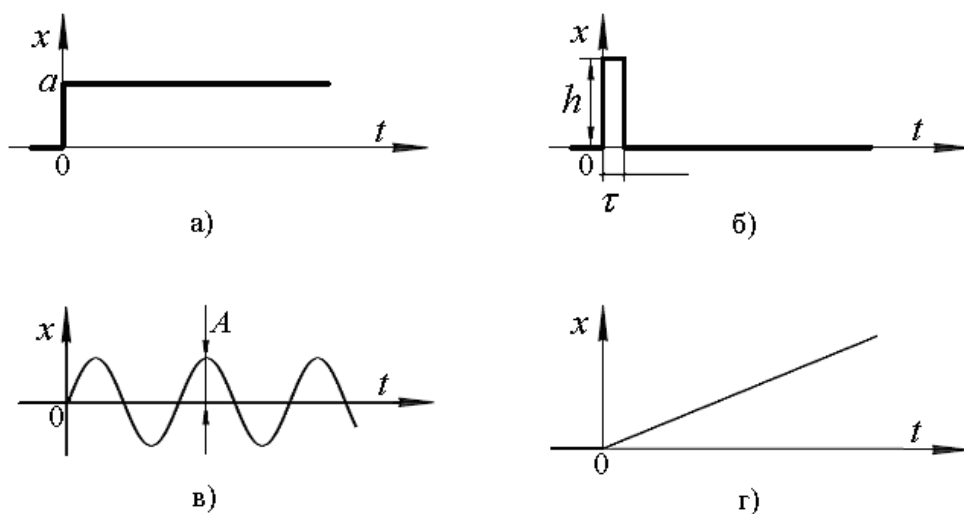


Рис. 1.7 - Типові впливи на САК

Математичний вираз $1(t)$ має вигляд

$$1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ 1 & \text{при } t \geq 0. \end{cases}$$

Відмітимо, що будь-який неединичний східчастий вплив можна представити виразом $a \cdot 1(t)$. Якщо східчастий вплив виникає в момент часу $t = t_1$, то використовують позначення вигляду $1(t - t_1)$.

Імпульсний вплив – вплив, що являє собою одиничний імпульс прямокутної форми, що має досить велику висоту h (див. рис. 1.7,б) і істотно меншу в порівнянні з інерційністю системи тривалість τ .

Найбільш часто використовують *одиничний імпульсний вплив* $\delta(t)$, що описується так званою *дельта-функцією*:

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty & \text{при } t = 0; \\ 0 & \text{при } t \neq 0, \end{cases} \quad \text{при чому} \quad \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1.$$

Тому $\delta(t)$ можна розглядати як імпульс, що має нескінченно велику висоту і нескінченно малу тривалість, площа якого дорівнює 1.

Дельта-функцію можна визначити також як похідну від $1(t)$, тобто

$$\delta(t) = 1'(t).$$

Основна властивість $\delta(t)$ виражається співвідношенням

$$\int_{-\infty}^{\infty} y(t) \delta(t - t_1) dt = y(t_1),$$

яке означає, що неединична імпульсна функція $y(t) \delta(t - t_1)$, отримана як добуток довільної функції $y(t)$ на дельта-функцію, існує тільки в момент $t = t_1$ і що площа її дорівнює значенню функції $y(t)$ в точці t_1 .

Гармонійний вплив – вплив, що описується функцією

$$x(t) = 1(t) \cdot A \cdot \sin(\omega t),$$

де: A_m - амплітуда, а ω - частота зміни (див. рис. 1.7,в).

Лінійний вплив – вплив, що описується функцією $x(t) = 1(t) \cdot at$ (див. рис. 1.7,а).

Тут коефіцієнт a характеризує швидкість наростання впливу $x(t)$.

1.8. Режими роботи САК

Будь-яка САК у процесі роботи може перебувати в двох якісно відмінних режимах залежно від характеру зовнішніх впливів і властивостей самої системи. Розрізняються ці режими за характером *зміни керованої величини в часі* і називаються статичним і динамічним.

Статичним режимом називають стан системи, при якому керована величина $y(t)$ не змінюється в часі, тобто $y(t) = \text{const}$. Цей режим може мати місце лише тоді, коли вхідні впливи постійні в часі, а система перебуває в рівноважному стані.

Динамічним режимом називають стан системи, при якому величина $y(t)$ змінюється в часі, тобто $y(t) = \text{var}$.

Динамічні режими мають місце, коли в системі після нанесення зовнішніх впливів відбуваються процеси встановлення заданого стану, тобто здійснюється керування. Вони, у свою чергу, підрозділяються на несталі й сталі.

Несталі динамічні режими мають місце відразу після зміни зовнішніх впливів. Процеси, що відбуваються при цьому в системі, називаються *перехідними процесами*.

Сталі динамічні режими роботи САК настають після закінчення перехідних процесів і характеризуються тим, що керована величина системи починає змінюватися в часі за таким же законом, як і задаючий вплив.

Проілюструємо поняття сталих і несталого режимів графіками можливих змін керованої величини $y(t)$ при типових впливах для САУ, описуваної диференціальним рівнянням вигляду $0,25y''(t) + 0,5y'(t) + y(t) = 10x(t)$ (див. рис. 1.8).

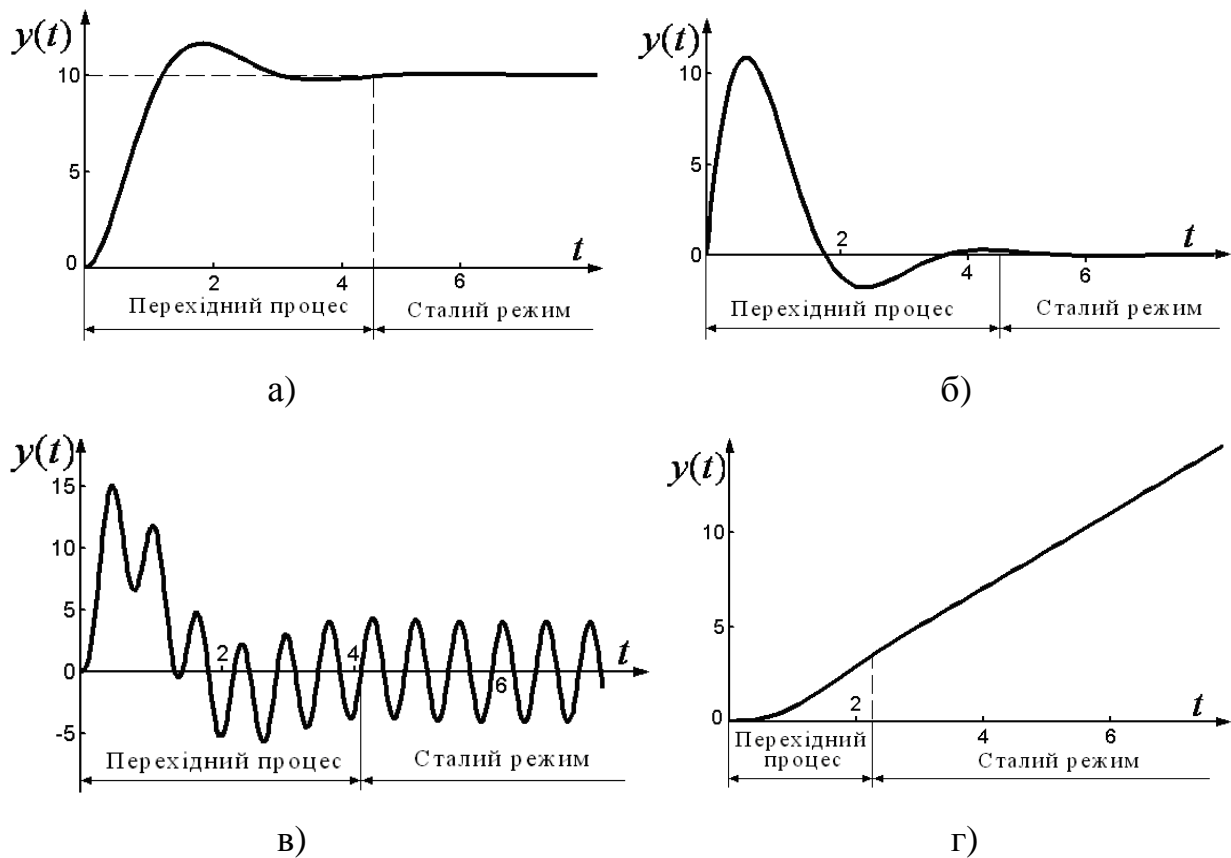


Рис. 1.8 - Реакції САК на типові впливи:

а) сигнал $x(t) = 1(t)$; б) сигнал $x(t) = \delta(t)$;

в) сигнал $x(t) = 1(t) \cdot 10 \cdot \sin(10t)$; г) сигнал $x(t) = 1(t) \cdot 0,2t$

1.9. Вимоги до САК

Ефективність САК в кожному конкретному випадку залежить від того, наскільки система задовольняє пропонованим до неї вимогам. *Основною вимогою є забезпечення заданої функціональної залежності між задаючим впливом і керованою змінною на виході системи.* Ідеальних систем, які виконували б цю вимогу абсолютно точно, не існує. Тому мова може йти лише про ступінь наближення роботи реальної системи до ідеалу. Для оцінки цього наближення використовують наступні *категорії вимог*:

- за *запасом стійкості* системи;
- за *величиною похибки в сталому стані* або статичній точності;
- по *поводженню системи в перехідному процесі* (сукупність цих вимог називається умовами якості);

- за динамічною точністю системи, тобто за величиною похибки при безупинно змінних впливах.

Найбільш важливою і необхідною з перерахованих вимог є стійкість роботи системи.

САК через наявність зворотних зв'язків схильні до коливань. У стійко працюючій системі спостерігаються загасаючі з часом коливання. Стійкість системи не повинна порушуватися під час її роботи при зміні в певних межах зовнішніх і внутрішніх умов. Тому вимога стійкості повинна задовольнятися з деяким запасом.

1.10. Класифікація САК

Системи автоматичного керування класифікують за різними ознаками.

За метою керування розрізняють системи стабілізації, програмного керування і системи спостереження.

За принципом дії САК можуть бути розімкнутими, замкнутими або комбінованими.

За можливістю контрольованих змін своїх властивостей САК можна розділити на два великих класи – адаптивні (здатні автоматично пристосовуватися до зміни зовнішніх умов і властивостей об'єкта) і неадаптивні.

Адаптивні системи, у свою чергу, класифікуються залежно від обсягу адаптаційних змін на:

екстремальні – міняються тільки керуючі впливи;

самонастроювальні – міняються керуючі впливи і параметри системи;

системи, що само організуються, – міняються керуючі впливи, параметри і структура системи;

системи, що навчаються, – міняються керуючі впливи, параметри і структура системи, алгоритм функціонування, а у випадку самонавчання і цільова функція.

За характером сигналів у ланцюзі керування розрізняють системи безперервні й дискретні (через дискретні проміжки часу відбувається комутація ланцюга впливів).

Дискретні системи, у свою чергу, розділяються на імпульсні (комутація ланцюга впливів відбувається примусово і періодично), релейні (переривчаста, східчаста зміна сигналів при безперервному характері вхідного сигналу) і цифрові (квантування сигналів відбувається як за часом, так і за рівнем).

За виглядом математичного опису виділяють лінійні (всі елементи описуються лінійними диференціальними та алгебраїчними рівняннями) й нелінійні системи (хоча б один елемент описується нелінійним рівнянням).

За величиною похибки $\delta(\infty)$ в сталому режимі САК діляться на статичні ($\delta(\infty) \neq 0$) й астатичні ($\delta(\infty) = 0$).

За характером параметрів розрізняють стаціонарні (параметри постійні) й нестаціонарні САК (параметри міняються).

Кожний з цих класів підрозділяється на системи із зосередженими й розподіленими параметрами

За кількістю керованих величин виділяють одномірні (одна керована величина) й багатомірні САК (таких величин багато)

Залежно від приналежності джерела енергії, за допомогою якого створюється керуючий вплив, системи можуть бути прямої і непрямой дії. У системах прямої дії використовується енергія керованого об'єкта. До них відносяться найпростіші системи стабілізації, в яких сприймаючий елемент через важільну систему безпосередньо діє на виконавчий орган (заслінку, клапан і т.д.). У системах непрямой дії керуючий вплив створюється за рахунок енергії додаткового джерела.

1.11. Узагальнена функціональна схема САК

При вивченні конкретної САК її зручно попередньо формально розділити на окремі типові елементи, виявити взаємозв'язки між цими елементами та відобразити їх у вигляді функціональної схеми. *Функціональною схемою САК називають умовне графічне зображення, що відбиває функції, виконувані окремими елементами системи, і зв'язки між цими елементами.*

У загальному випадку САК являють собою комплекси взаємодіючих елементів, робота яких заснована на різних фізичних принципах (механічних, електричних, гідравлічних і т.д.). Однак незважаючи на це різноманіття, елементи САК можуть бути зведені до декількох основних типів, що розрізняються за їхнім призначенням. Відповідно до цього можна говорити про *узагальнену функціональну схему*. Така схема подана на рис. 1.9.

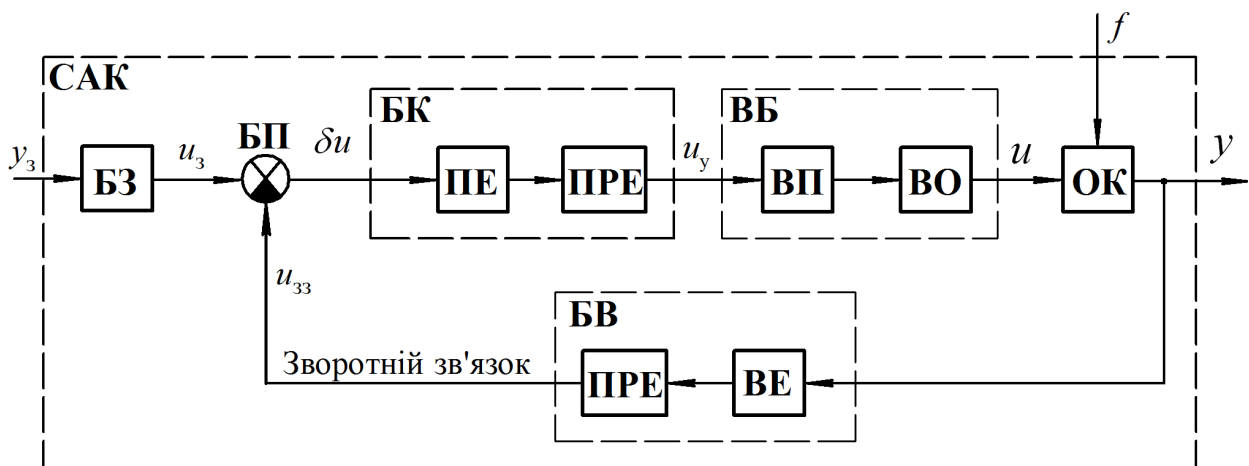


Рис. 1.9 - Узагальнена функціональна схема САК

Частинами функціональної схеми є умовні зображення функціональних блоків і елементів, а також зв'язків між ними у вигляді ліній зі стрілками. Стрілки показують напрямок передачі сигналів взаємодії. Функціональні блоки й елементи зображують у вигляді прямокутників, усередині яких записують їхню назву.

З рисунка видно, що *типовими функціональними блоками САК є:*

- блок задання БЗ, який служить для введення в систему необхідного закону зміни керованої величини – задаючого впливу $y_3(t)$ і перетворення його у величину сигналу $u_3(t)$ задання, зручну для використання (найчастіше в електричну величину – напругу);

- блок виміру БВ, що вимірює дійсне значення керованої величини $y(t)$ і перетворює його у величину сигналу зворотного зв'язку $u_{oc}(t)$;

- блок порівняння БП, що виконує порівняння сигналів $u_3(t)$ і $u_{oc}(t)$. Вихідний сигнал цього блоку $\Delta u(t)$ визначається зі співвідношення $\Delta u(t) = u_3(t) - u_{oc}(t)$ і називається *сигналом неузгодженості*, або *сигналом похибки*. Затемнений сектор показує, що величина, що входить у нього, від'ємна.

Припустимим також є замість затемнення сектора застосовувати знак “-”;

- блок керування БК, що визначає відповідно до алгоритму керування величину необхідного сигналу керування $u_y(t)$;

- виконавчий блок ВБ, що виробляє керуючий вплив $u(t)$, який прикладається безпосередньо до ОК.

Кожний з перерахованих блоків може, у свою чергу, складатися з декількох більше простих частин – елементів. Так, на наведеній схемі показані: *підсилювальний елемент* ПЕ, який служить для посилення вхідних сигналів; *перетворюючий елемент* ПРЕ, що забезпечує спільну роботу елементів з різною фізичною природою; *вимірювальний елемент* ВЕ.

До складу виконавчого блоку звичайно входять ще дві частини: *виконавчий пристрій* ВП і *виконавчий орган* ВО. В якості ВП використовують двигуни різних типів або інші джерела енергії. ВО звичайно є заслінки, вентилі та інші дозуючі пристрої. Іноді ВО становить з ОК єдине ціле, тоді доцільно відносити його до ОК.

У загальному випадку досить складна САК може включати кілька контурів зворотних зв'язків. Тоді зворотний зв'язок, що передає інформацію про значення керованої величини на вхід САК, називають *головним зворотним зв'язком*, а всі інші – *місцевими*.

На функціональних схемах конкретних САК вказують не загальне призначення блоків, а їхнє конкретне найменування, наприклад, двигун М, тиристорний перетворювач ТП, тахогенератор ТГ.

1.12. Приклади САК

Приклад 1.1. Система автоматичної стабілізації кутової швидкості двигуна постійного струму з незалежним збудженням, що реалізує принцип розімкнутого керування за збурюючим впливом.

Принципова схема системи наведена на рис. 1.10.

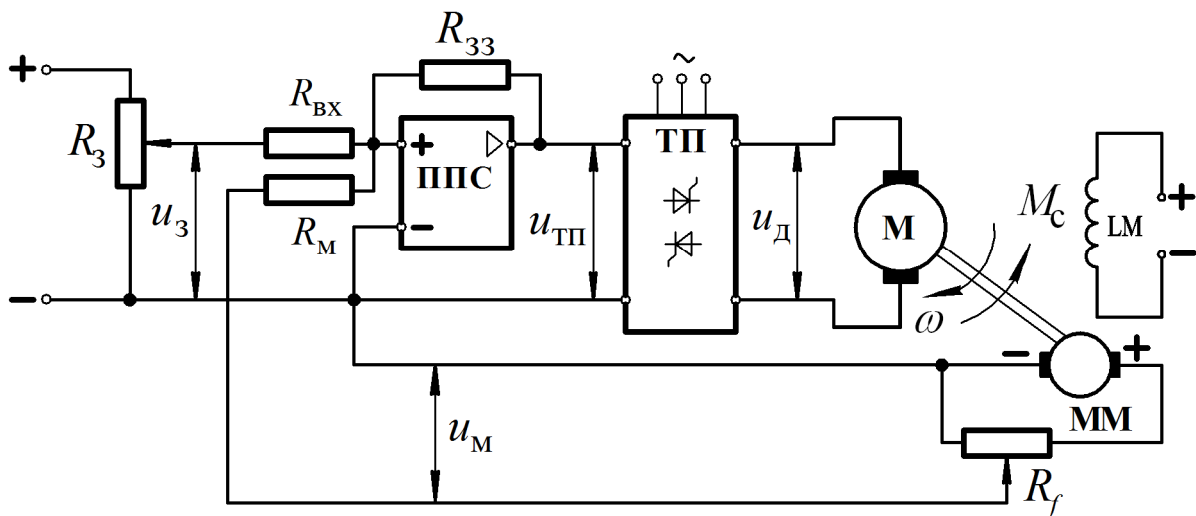


Рис 1.10 - Принципова схема системи, що реалізує принцип розімкнутого керування за збурюючим впливом

Тут: М - керований двигун; ω_D - його кутова швидкість; LM - обмотка збудження.

Блоком задання у схемі є потенціометр R_3 . Напруга u_3 , пропорційна заданому значенню швидкості робочого механізму ω_3 ($u_3 = k_3 \cdot \omega_3$), де k_3 -

коефіцієнт пропорційності, знімається із движка цього потенціометра і служить сигналом задання.

Для врахування дії основного збурюючого впливу, - моменту статичного опору (моменту навантаження M_c) використовуються моментна муфта ММ і підсилювач постійного струму УПТ. Моментна муфта виконує функцію блоку виміру. Вихідна напруга муфти u_m , що знімається із движка потенціометра R_f , пропорційна моменту M_c - $u_m = k_m \cdot M_c$, де, k_m - коефіцієнт передачі муфти. Напруги u_m і u_z підсумовуються за допомогою опорів R_{bx} і R_m на вході операційного підсилювача і підсилюються. таким чином, УПТ виконує функції суматора й підсилювача напруги.

Тиристорний перетворювач ТП складається з керованого випрямляча, що перетворює змінну напругу в постійну, і системи фазового-імпульсного керування СІФК, що формує послідовність імпульсів, які надходять на управляючі електроди випрямляча. ТП виконує функцію підсилювача потужності.

Напруга на якорі двигуна u_d є керуючим впливом, її залежність від швидкості ω_z і моменту M_c визначає алгоритм керування розімкнутої системи:

$$u_{\text{ТП}} = (k_z \cdot \omega_z + k_m \cdot M_c) \cdot k_{\text{УПТ}} \cdot k_{\text{ТП}}.$$

Функціональна схема системи наведена на рис. 1.11.

При відсутності зв'язку по збурюванню ($k_m = 0$) напруга u_d на вході двигуна визначається лише напругою u_z , що знімається із R_z потенціометра. При збільшенні M_c вона залишається постійною, що приводить до зменшення швидкості обертання двигуна.

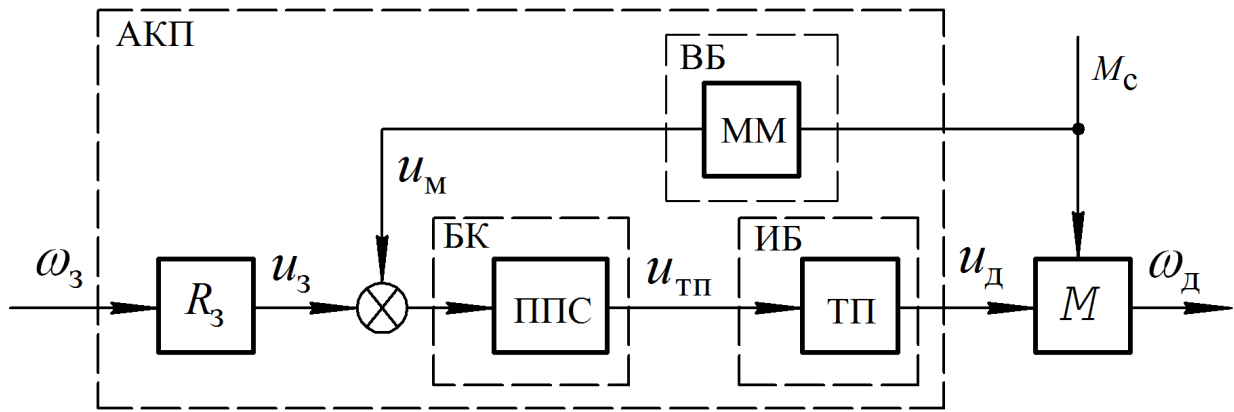


Рис 1.11 - Функціональна схема системи, що реалізує принцип розімкнутого керування за збурюючим впливом

При наявності зв'язку по збурюванню ($k_M > 0$) зі зростанням M_c збільшується u_M , у результаті чого зростають напруги $u_{ТП}$ і u_D . Це приводить до певної компенсації впливу M_c і, отже, міняє залежність швидкості обертання двигуна від величини збурюючого впливу M_c .

На рис. 1.12 показані залежності $\omega_D = f(M_c)$ при різних значеннях коефіцієнта k_M .

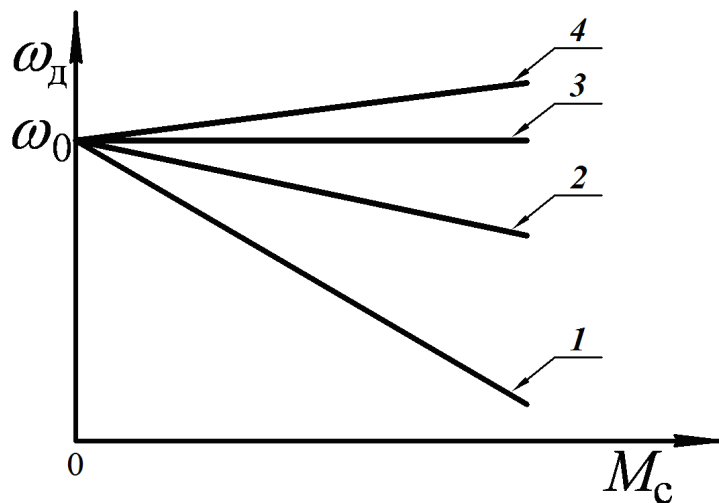


Рис 1.12 - Залежності $\omega_D = f(M_c)$ при різних значеннях коефіцієнта k_M

Залежність 1 відповідає режиму $k_M = 0$. Зі збільшенням k_M шляхом переміщення движка потенціометра R_f падіння швидкості ω_d зменшується (залежність 2). При відповідних положеннях движка можна домогтися повної компенсації впливу навантаження (залежність 3) або навіть перекомпенсації (залежність 4).

Таким чином, ступінь компенсації впливу збурюючого впливу M_c у системі залежить від ступеня адекватності характеристики $\omega_d = f(M_c)$ об'єкта та від точності виміру збурюючого впливу.

Приклад 1.2. Система автоматичної стабілізації кутової швидкості двигуна постійного струму з незалежним збудженням, що реалізує принцип керування за відхиленням.

Принципова схема системи показана на рис. 1.13.

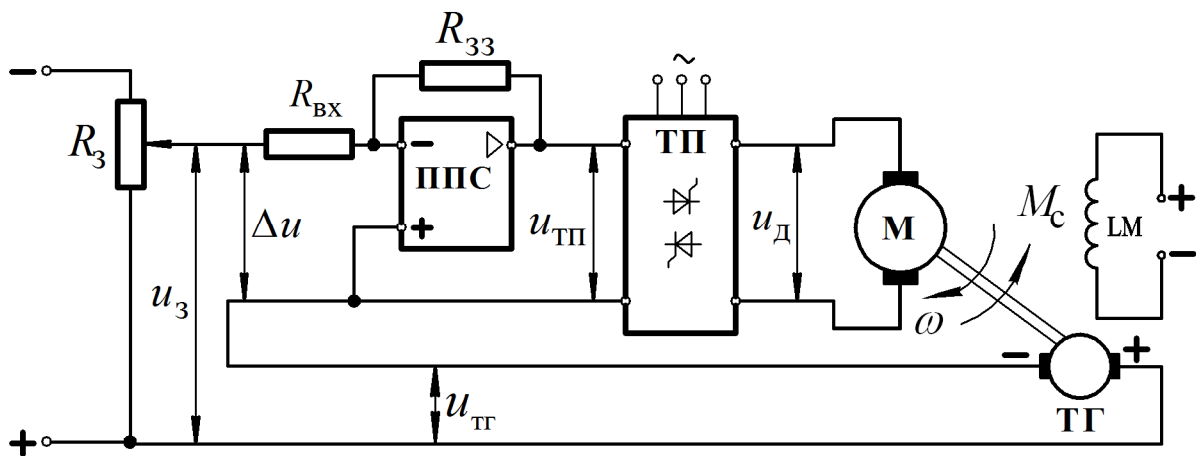


Рис 1.13 - Принципова схема системи, що реалізує принцип керування за відхиленням

Формування сигналу похибки $\Delta u(t)$, пропорційного похибці $\Delta(t) = \omega_3 - \omega_d(t)$, здійснюється за допомогою задаючого потенціометра R_3 і тахогенератора ТГ, які включені так, що їхні вихідні напруги u_{TG} та u_3 спрямовані зустрічно, тобто

$$\Delta u = u_3 - u_{\text{тг}}.$$

Посилена за величиною і потужністю в підсилювачі постійного струму і тиристорному перетворювачі ТП, вихідна напруга $u_{\text{тг}}$, прикладена до ланцюга якоря двигуна, здійснює відповідну зміну швидкості обертання двигуна, зменшуючи величину $\Delta(t)$.

Думаючи, що

$$u_3 = k_3 \cdot \omega_3, \quad u_{\text{тг}} = k_{\text{тг}} \cdot \omega_{\text{д}}(t), \quad u_{\text{тп}} = k_{\text{тп}} \cdot (u_3 - u_{\text{тг}}),$$

одержуємо при $k_3 = k_{\text{тг}} = k$ наступний вираз для сигналу керування на вході ТП:

$$u_{\text{тп}}(t) = k \cdot k_{\text{тп}} \cdot [\omega_3 - \omega_{\text{д}}(t)] = k \cdot k_{\text{тп}} \cdot \Delta(t),$$

де $k_{\text{тп}}$ - коефіцієнт передачі УПТ.

Функціональна схема системи наведена на рис. 1.14.

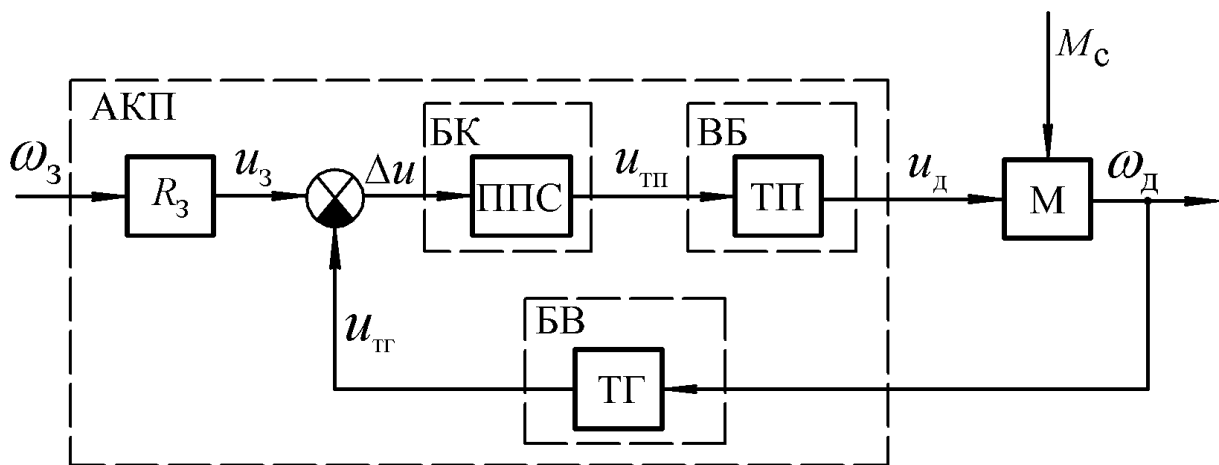


Рис 1.14 - Функціональна схема системи, що реалізує принцип керування за відхиленням

Розглянемо роботу системи. Нехай $M_c(t) = M_{c,0} = \text{const}$ і $u_3 = \text{const}$. Тоді маємо: $\omega_{\text{д}}(t) = \omega_0$, $u_{\text{д}}(t) = u_{\text{д},0}$, $u_{\text{тг}}(t) = u_{\text{тг},0}$, $\Delta u = u_3 - u_{\text{тг},0} = \Delta u_0$. При збільшенні моменту навантаження, наприклад,

до значення $M_{c,1} > M_{c,0}$, швидкість двигуна зменшиться на величину $\Delta \omega_1$ і стане рівною $\omega_1 = \omega_0 - \Delta \omega_1$ (див. рис. 1.15, крива 1).

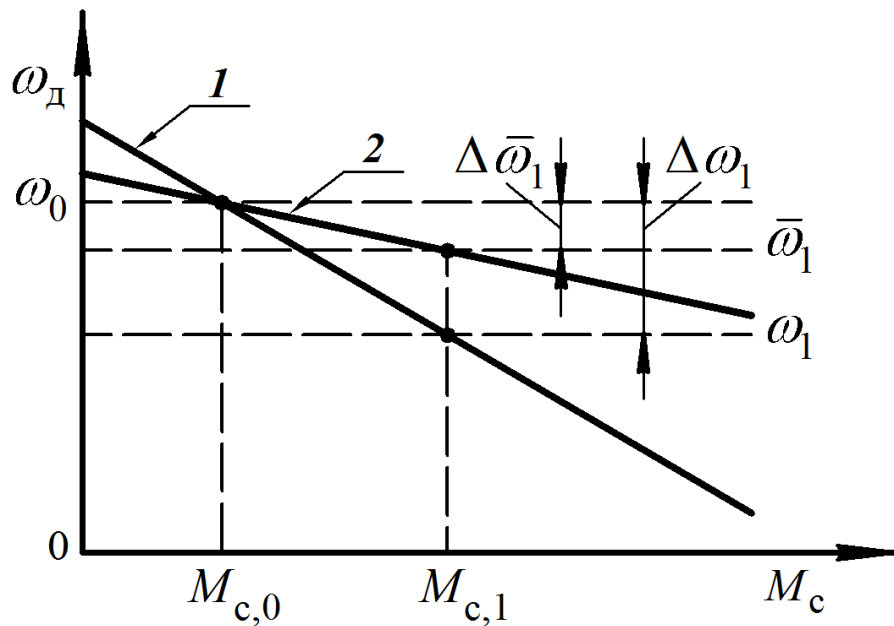


Рис 1.15 – Механічні характеристики системи, що реалізує принцип керування за відхиленням

Величина $\Delta \omega_1$ відповідає падінню швидкості двигуна при відсутності керування.

Вплив зворотного зв'язку полягає в тому, що зі зниженням швидкості зменшується напруга тахогенератора $u_{тг} = u_{тг,0} - \Delta u_{тг,1}$. Відповідно зростає сигнал неузгодженості $\Delta u = u_z - u_{тг} = u_z - (u_{тг,0} - \Delta u_{тг,1}) = \Delta u_0 + \Delta u_{тг,1}$. Це приводить до зростання напруги на якорі двигуна $u_{д,1}$ і швидкості обертання ω_d . Після закінчення перехідного процесу система переходить у новий сталий режим, що характеризується напругою $u_{д,1} > u_{д,0}$ і відповідною цій напрузі швидкістю обертання $\bar{\omega}_1$. Однак нове стає значення швидкості буде менше того значення, що було до початку процесу керування, тобто $\bar{\omega}_1 < \omega_0$ (див. мал. 1.15, крива 2). Дійсно, при збільшенні моменту навантаження знижується швидкість обертання, для то-

го щоб її збільшити, потрібно збільшити напругу u_d , що може бути здійснено тільки при зменшенні напруги $u_{тг}$, а отже, і швидкості обертання двигуна.

Таким чином, розглянута система характеризується наявністю в сталому режимі похибки $\Delta \bar{\omega}_1 = \omega_0 - \bar{\omega}_1$, величина якої залежно від коефіцієнта підсилення тахогенератора, може бути значно менше похибки $\Delta \omega_1$ при відсутності зворотного зв'язку ($k_{тг} = 0$).

Приклад 1.3. Слідкуюча система, керування кутом повороту робочого механізму.

Принципова схема системи наведена на рис. 1.16.

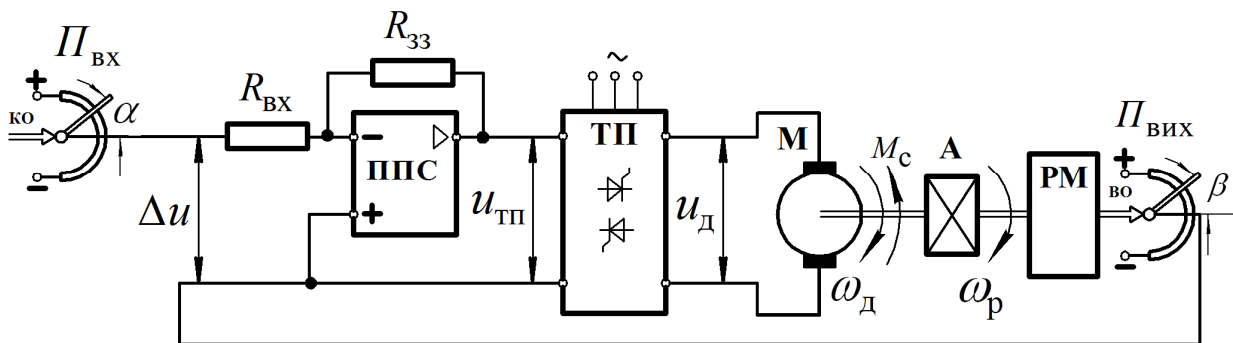


Рис 1.16 - Принципова схема слідкуючої системи

Об'єктом керування в даній системі є робочий механізм РМ. Керованою величиною є кут повороту вала робочого механізму β або, що те саме, кут повороту движка потенціометра $\Pi_{\text{ВЫХ}}$, оскільки цей потенціометр розташований на одному валу з робочим механізмом (на виконавчій осі ІО), а задаючим сигналом - кут α повороту движка $\Pi_{\text{ВХ}}$ потенціометра, що розташований на командній осі КО.

АКП складається з вимірювальних пристроїв $\Pi_{\text{ВХ}}$ і $\Pi_{\text{ВЫХ}}$, підсилювача постійного струму ППС, реверсивного тиристорного перетворювача ТП, двигуна постійного струму з незалежним збудженням М і редуктора А. Ал-

горитм функціонування САК полягає в тому, щоб виконавча вісь ИО стежила за положенням, яке довільно змінюється, осі КО, тобто $\beta(t) = \alpha(t)$ при дії на елементи системи різних збурювань, зокрема моменту статичного опору M_c .

Сигнал неузгодженості $\Delta u(t)$ визначається співвідношенням

$$\Delta u(t) = u_\alpha(t) - u_\beta(t) = k_\Pi [\alpha(t) - \beta(t)] = k_\Pi \Delta(t),$$

де: u_α і u_β - відповідно, вихідні напруги потенціометрів $\Pi_{\text{ВХ}}$ і $\Pi_{\text{ВЫХ}}$; k_Π - передаточний коефіцієнт вимірювальних пристроїв (потенціометри $\Pi_{\text{ВХ}}$ і $\Pi_{\text{ВЫХ}}$ мають однакові конструкції і параметри). Сигнал $\Delta u(t)$ підсилюється в ППС і надходить на вхід ТП. У результаті на якірній обмотці двигуна формується напруга. Величина $u_d(t)$ залежить від величини сигналу неузгодженості і передатних коефіцієнтів тиристорного перетворювача $k_{\text{ТП}}$ і підсилювача постійного струму $k_{\text{УПТ}}$:

$$u_d(t) = k_{\text{УПТ}} \cdot k_{\text{ТП}} \cdot \Delta u(t) = k_{\text{УПТ}} \cdot k_{\text{ТП}} \cdot k_\Pi \cdot \Delta(t).$$

Тиристорний перетворювач ТП, двигун М і редуктор А утворюють виконавчий блок. Вихідним сигналом цього блоку є швидкість обертання вихідного вала редуктора ω_p , що є керуючим впливом на РМ.

Функціональна схема системи наведена на рис. 1.17.

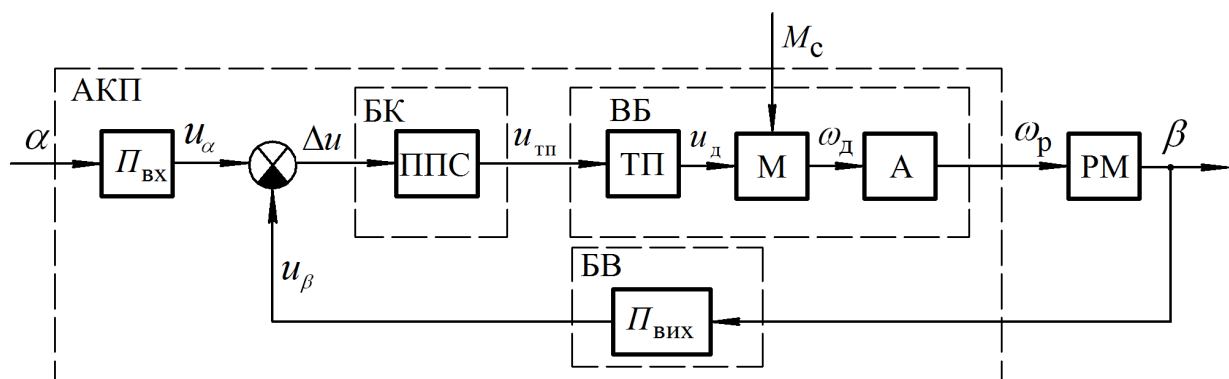


Рис 1.17 - Функціональна схема слідкуючої системи

Розглянемо роботу системи. При ідентичному положенні командної і виконавчої осей кут неузгодженості між ними дорівнює нулю. Дорівнюють нулю також напруги Δu і u_d , тобто двигун і вся система перебувають у спокої. При повороті командної осі на деякий кут виникає кут неузгодженості $\Delta = \alpha - \beta$ і пропорційні йому напруги. Під впливом напруги u_d двигун починає обертатися і через редуктор повертає виконавчу вісь і движок потенціометра $P_{\text{вих}}$ убік зменшення кута неузгодженості доти, поки цей кут не стане рівним нулю. При повороті командної осі в іншу сторону міняється полярність напруги, що прикладається до двигуна, і, отже, напрямок його обертання.

Контрольні питання

1. Назвіть завдання, що вирішуються в курсі теорії автоматичного керування.
2. Яку роль відіграє автоматизація на сучасному етапі розвитку науки й техніки?
3. Укажіть переваги й недоліки принципів керування, застосовуваних у САК.
4. Що таке функціональна схема САК?
5. На які класи діляться САК за метою керування?
6. На які класи діляться САК за виглядом у математичного опису?
7. Що таке перехідний процес?
8. Які типові впливи використовують при вивченні динаміки елементів і систем?
9. Які ознаки елементів системи керування відображаються на її функціональній схемі?
10. Назвіть найпоширеніші функціональні елементи систем керування.
11. На які класи розділяються системи керування за величиною похибки $\delta(\infty)$ у сталому режимі?
12. На які класи розділяються системи керування за принципом дії?
13. Які переваги й недоліки мають розімкнуті системи керування?
14. Які переваги й недоліки мають замкнуті системи керування?