

**Міністерство освіти і науки України
Академія митної служби України**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЇ З ДИСЦИПЛІНИ
“ЗАСОБИ АВТОМАТИКИ ТА
ТЕЛЕМЕХАНІКИ”
ЗА НАПРЯМОМ 6.070101
“ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ”**

**НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК ДЛЯ СЛУХАЧІВ І КУРСУ
ЗАОЧНОЇ ФОРМИ НАВЧАННЯ**

**Затверджено науково-методичною радою
Академії митної служби України**



АМСУ

**Дніпропетровськ
2013**

Конспект лекції з дисципліни “Засоби автоматики та телемеханіки” за напрямом 6.070101 “Транспортні технології” [Текст]/ Навч. Посібник для слухачів і курсу заочної форми навчання. Укл. С.А.Разгонов,— Дніпропетровськ: Академія митної служби України, 2013. – 61 с.

Укладач:

- С. А. Разгонов, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних систем і технологій Академії митної служби України.

Друкується в авторській редакції.

Підписано до друку __.__.2013. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.
Ум. друк. арк. 0,00. Облік.-вид. арк. 0,0. Тираж 100 прим.
Замовлення №
Дніпропетровськ: Академія митної служби України (свідоцтво про
видавничу діяльність ДК № 10 від 24.02.2000 р.).
49000, м. Дніпропетровськ, вул. Рогальова, 8.

Зміст

Передмова.....	4
ЛЕКЦІЯ 1. Основні поняття та визначення автоматики	5
ЛЕКЦІЯ 2. Призначення первинних перетворювачів у системах автоматичного управління. Характеристики перетворювачів	10
ЛЕКЦІЯ 3. Мостові вимірювальні схеми. Омичні і тензометричні датчики.....	17
ЛЕКЦІЯ 4. Акустичні перетворювачі. Модуляторні та генераторні перетворювачі температури. Фотоелектричні перетворювачі, фотореле	26
ЛЕКЦІЯ 5. Кутові електромашинні перетворювачі та сельсини	31
ЛЕКЦІЯ 6. Електронні елементи систем керування	38
ЛЕКЦІЯ 7. Цифроаналогові та аналого-цифрові перетворювачі	43
ЛЕКЦІЯ 8. Електромагнітні елементи систем автоматики	50
ЛЕКЦІЯ 9. Електричні машини систем автоматики	57
Рекомендована література	61

Передмова

У навчальному посібнику наведено основні відомості з дисципліни "Засоби автоматичної та телемеханіки" для слухачів заочної форми навчання спеціальності 6.070101 "Транспортні системи" у відповідності до затвердженої Міністерством освіти і науки України робочою навчальною програмою. Лекційний курс складений у стислій формі з метою викласти основні поняття, необхідні для освоєння базового теоретичного матеріалу та виконання лабораторних й практичних робіт.

Посібник створено з метою навчити слухачів основ дисципліни та надати допомогу з вивчення дисципліни. Він може бути використаний для самостійної роботи під час підготовки до занять. До кожної лекції додаються рисунки і контрольні питання для самостійного розв'язання, що забезпечує можливість індивідуальної роботи.

ЛЕКЦІЯ 1. Основні поняття та визначення автоматичної

Автоматика – сукупність методів і технічних засобів, які виключають участь людини у процесі.

Управління – сукупність впливів, які спрямовані на здійснення якогось процесу для досягнення певної мети.

Автоматичне управління (АУ) – здійснюється без участі людини.

Система автоматичного управління (САУ) – сукупність приладів та обладнання для здійснення будь-якого процесу без прямої участі людини.

Система АУ може виконувати різні функції: пуск, зупинку та реверс машин і механізмів, підтримання будь-якого параметра на заданому рівні, зміну будь-якого параметра за заданою програмою, відтворення якогось параметра відповідно до випадкового завдання, що змінюється (стеження).

Впливи та різновиди впливів

Режим роботи приладу або системи може змінюватись у результаті деяких факторів, які називаються впливами або збуреннями.

Розрізняють такі види впливів: задавальний, керувальний та збурювальний.

Задавальним називається вплив, який вводиться в систему для визначення закону зміни вихідної величини.

Керувальним називається вплив, який забезпечує зміну вихідної величини за заданим законом.

Збурювальним називається вплив, який порушує зміну вихідної величини за заданим законом.

Збурювальний вплив, який різко змінює хід процесу, називається основним, інші збурювальні впливи – другорядними.

Всі впливи, які застосовуються до системи автоматичного регулювання, – це функції часу, що повільно змінюються.

Типові види впливів

Під час дослідження систем автоматичного регулювання використовують декілька так званих типових впливів.

Одиничний стрибок та східчастий вплив. Таким впливам відповідає раптове скидання або збільшення навантаження, вмикання або вимикання напруги тощо.

Математично одиничний стрибок визначається:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & \text{якщо } t < 0 \\ 1 & \text{якщо } t = 0 \text{ і } t > 0 \end{cases}$$

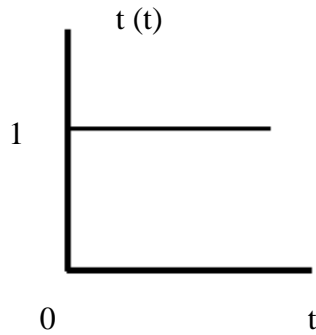


Рис. 1.1. Типовий вплив – одиничний стрибок

Східчастий вплив:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & \text{якщо } t < 0 \\ A & \text{якщо } t = 0 \text{ і } t > 0 \end{cases}$$

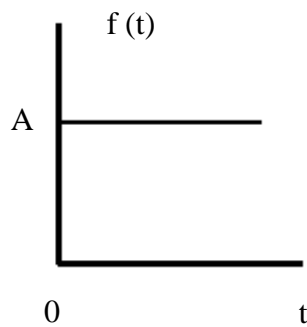


Рис. 1.2. Типовий вплив – східчастий вплив

Одиничний імпульс – це вплив нескінченно великої величини h і нескінченно малої тривалості Δt при умовах, що $h \cdot \Delta t = 1$.

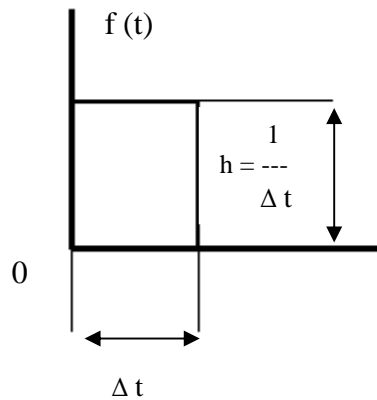


Рис. 1.3. Типовий вплив – одиничний імпульс

Імпульсний вплив – це вплив нескінченно великої величини H і нескінченно малої тривалості Δt , за умови, що $H \cdot \Delta t = A = \text{const}$.

Точно реалізувати одиничний імпульс та імпульсний вплив неможливо, їх можна реалізувати тільки приблизно. Імпульс $h \cdot \Delta t = 1$ при $h \rightarrow \infty$ і $\Delta t \rightarrow 0$ називають δ -функцією.

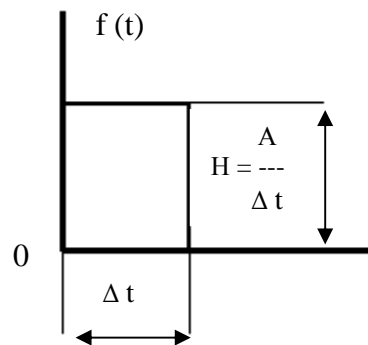
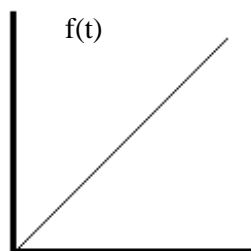


Рис. 1.4. Типовий вплив – імпульсний вплив

Лінійний вплив – це вплив, який змінюється за лінійним законом $f(t) = gt$, де g – кутовий коефіцієнт.



Синусоїдальний вплив – це вплив, який змінюється за синусоїдальним законом $f(t) = A \sin \omega t$, де A – амплітуда, ω – колова частота.

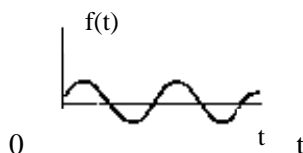


Рис. 1.6. Типовий вплив – синусоїдальний вплив

Типові структурні одиниці САУ

Звичайно всі САУ складаються з обмеженої кількості елементів, які виконують невелике число функціональних завдань. Згідно з цим всі елементи можна поділити на: елементи, що сприймають (С); елементи, що задають (З); елементи, що порівнюють (П); елементи, що перетворюють та посилюють (ПП); виконавчі елементи (В) і коректуючі елементи (К). Елементи К можуть бути ввімкнуті на будь-якій ділянці структурної схеми.

Основне завдання цього курсу є вивчення принципів дії конструктивних або схематичних особливостей і технічних характеристик перелічених вище елементів.

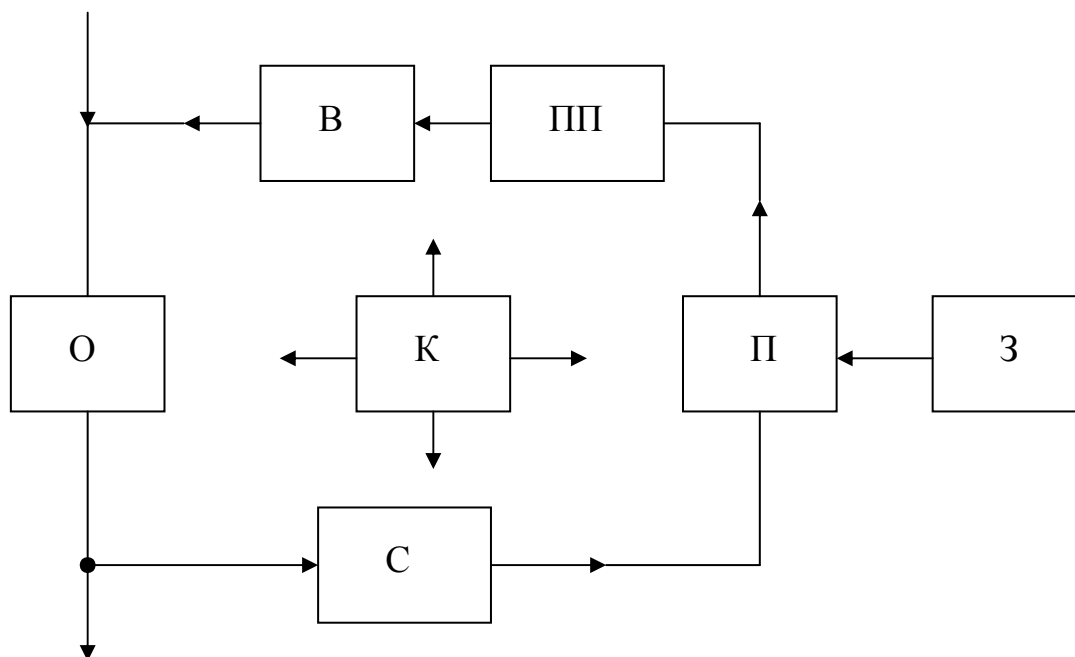


Рис. 1.7. Функціональна структурна схема системи автоматичного регулювання

Прямий та зворотний зв'язок

Між елементами структурної схеми САУ існує як прямий, так і зворотний зв'язок. При цьому під прямим зв'язком розуміють таке з'єднання елементів, коли вихід кожного попереднього елемента з'єднується з входом наступного елемента. Під зворотним зв'язком розуміють такий зв'язок між елементами структурної схеми САУ, коли вихід наступного або останнього елемента з'єднується з входом попереднього або навіть першого елемента структурної схеми САУ.

Зворотні зв'язки мають важливе значення не тільки в САУ, але і в живих організмах. Без зворотних зв'язків існування живих організмів було б неможливе.

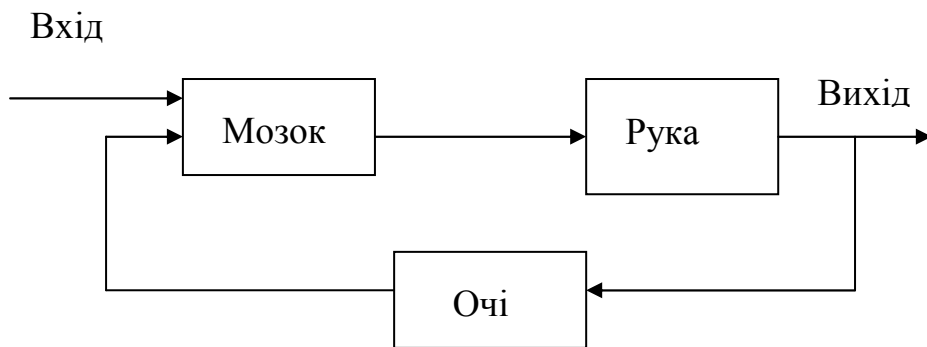


Рис. 1.8. Функціональна схема системи управління рукою людини

Зворотний зв'язок забезпечує зв'язок між виходом системи та її входом, дозволяє враховувати відхилення вихідної величини від заданого значення, вносити необхідні корективи в керувальний вплив.

Види зворотних зв'язків

В САУ розрізняють зовнішній зворотний зв'язок, який з'єднує вихід системи з входом, і внутрішній зворотний зв'язок, який з'єднує вихід окремих елементів або групи послідовно з'єднаних елементів з їх входом.

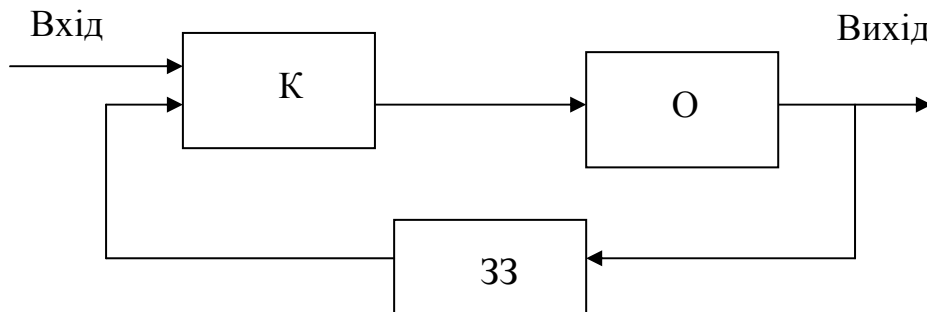


Рис. 1.9. Система автоматичного управління зі зворотним зв'язком

За характером передавання впливів зворотні зв'язки діляться на жорсткі та гнучкі. Жорсткий зворотний зв'язок діє як у сталому режимі так

і при перехідному процесі. Гнучкий зворотний зв'язок діє тільки під час перехідного процесу, а у сталому режимі його дія закінчується.

Залежно від знака впливу зворотного зв'язку розрізняють позитивний і негативний зворотні зв'язки. Позитивним називається зворотний зв'язок, який зі збільшенням сигналу на виході елемента передає на його вхід сигнал, який знову збільшує сигнал на виході. Негативний зв'язок дозволяє при збільшенні сигналу на виході системи передати на вхід такий сигнал, який зменшить вихідний сигнал і навпаки: при зменшенні вихідного сигналу зворотний зв'язок буде його збільшувати.

Контрольні питання

1. Основні поняття та визначення автоматики (автоматика, управління, САУ)?
2. Різновиди впливів?
3. Типові види впливів?
4. Основні структурні елементи САУ?
5. Види зв'язків між елементами САУ та їх визначення?
6. Види зворотних зв'язків?
7. Визначення позитивного зворотного зв'язку?
8. Визначення негативного зворотного зв'язку?

ЛЕКЦІЯ 2. Призначення первинних перетворювачів у системах автоматичного управління. Характеристики перетворювачів

Найважливішу роль у будь-якій САУ відіграють сприймаючі елементи, які слугують для виміру дійсного значення контрольованого або регульованого параметру і перетворення його на більш зручний сигнал для подальшого руху інформації. Тому сприймаючі елементи називають первинними перетворювачами або датчиками.

У найпростішому випадку датчик здійснює тільки одне перетворення $Y = f(x)$. Такий вид датчиків називають датчиками з безпосереднім перетворенням. Однак у ряді випадків не вдається безпосередньо перетворити вхідну величину X у вихідну Y . В цьому випадку здійснюють послідовне перетворення: вхідною величиною X впливають на проміжну Z , а потім проміжною впливають на вихідну Y , тобто $Z=f_1(x)$, а потім

$$Y = f_2(z) = f_2[f_1(x)] = F(x).$$

Датчики, що мають такі залежності, називаються датчиками з послідовним перетворенням. Число таких перетворень може бути і більше двох.

Вхідна частина таких датчиків називається сприймаючим органом, вихідна – виконавчим органом, всі інші – проміжні органи.

Класифікація датчиків

Величезна різноманітність датчиків, які застосовуються у сучасній автоматичній, викликає необхідність їхньої класифікації. На даний час відомі такі типи датчиків, які найбільш доцільно класифікувати за вхідною величиною, що практично відповідає принципів дії:

Найменування датчика	Вхідна величина
Механічний	переміщення твердого тіла
Електричний	електричний розмір
Гідравлічний	переміщення рідини
Пневматичний	переміщення газу
Термічний	теплість
Оптичний	світлова величина
Акустичний	звукова величина
Радіохвильовий	радіохвилі
Ядерний	ядерні випромінювання

Ознайомлення з усіма цими датчиками можливе тільки в спеціальних роботах, присвячених датчикам. Тут розглядаються найбільш поширені датчики, у котрих хоча б одна з величин (вхідна або вихідна) – електрична.

Електричні датчики залежно від принципу виконаного ними перетворення діляться на два типи - модулятори і генератори.

У *модуляторах* енергія входу впливає на допоміжний електричний ланцюг, змінюючи його параметри і модулюючи значення та характер зміни струму або напруги від стороннього джерела енергії. Завдяки цьому одночасно підсилюється сигнал, що надходить на вхід датчика.

Наявність стороннього джерела енергії є обов'язковою умовою роботи датчиків-модуляторів (рис. 2.1.а).

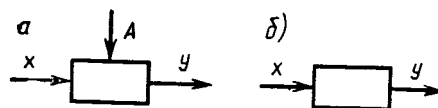


Рис. 2.1. Функціональні блоки датчика-модулятора (а) і датчика-генератора (б)

Модуляція здійснюється за допомогою зміни одного з трьох параметрів – омичного опору, індуктивності і ємності. Відповідно до цього розрізняють групи омичних, індуктивних і ємнісних датчиків.

Кожна з цих груп може ділитися на підгрупи. Так, найбільшу групу омичних датчиків можна поділити на підгрупи: тензорезистори,

потенціометри, терморезистори, фоторезистори. До другої підгрупи належать варіанти індуктивних датчиків – магнітопружні і трансформаторні. Третя підгрупа об'єднує ємнісні датчики різного типу.

Датчики-генератори є просто перетворювачами (рис. 2.1.б). їх дія ґрунтується на виникненні електрорушійної сили під впливом різних процесів, пов'язаних з контрольованою величиною. Виникнення такої електрорушійної сили може відбуватися, наприклад, внаслідок електромагнітної індукції, термоелектрики, п'єзоелектрики, фотоелектрики та інших явищ, що викликають поділ електричних зарядів. Відповідно до цих явищ генераторні датчики поділяються на індукційні, термоелектричні, п'єзоелектричні і фотоелектричні.

Можливі ще групи електротехнічних, електростатичних датчиків, датчиків Хола та ін. У результаті утворюється загальна схема класифікації основних датчиків за вихідною електричною величиною, яка подана на рис. 2.2.

Статичні характеристики та параметри

В автоматичній телемеханіці властивості окремих елементів САУ оцінюються різними показниками, які пов'язані з вхідними та вихідними величинами. Найважливішу роль тут відіграє функціональна залежність вихідної величини від вхідної, яка відображена математично або графічно. Така залежність називається статичною характеристикою елемента $Y = f(x)$.

За допомогою статичної характеристики можна уявити, лінійний це елемент чи нелінійний, можна визначити вид сприймаючого елемента (датчик чи реле). Наприклад, якщо статична характеристика безперервна, то такий елемент виявляється датчиком, а якщо статична характеристика змінюється стрибком – це реле.

За статичною характеристикою можна визначити розмір коефіцієнта передачі елемента, який визначається як відношення вихідної величини до вхідної $K = Y/X$.

Якщо статична характеристика лінійна, то коефіцієнт передачі є величиною постійною, а для елементів з нелінійною статичною характеристикою – це величина змінна, яка залежить від X , тобто $K = f(x)$.

Якщо вхідна і вихідна величини мають однакову розмірність, то коефіцієнт передачі розмірності не має і його називають коефіцієнтом підсилення.

Коефіцієнт передачі датчиків називають також чутливістю. Чим більший K датчика, тим більша вихідна величина при однаковому значенні вхідної величини.

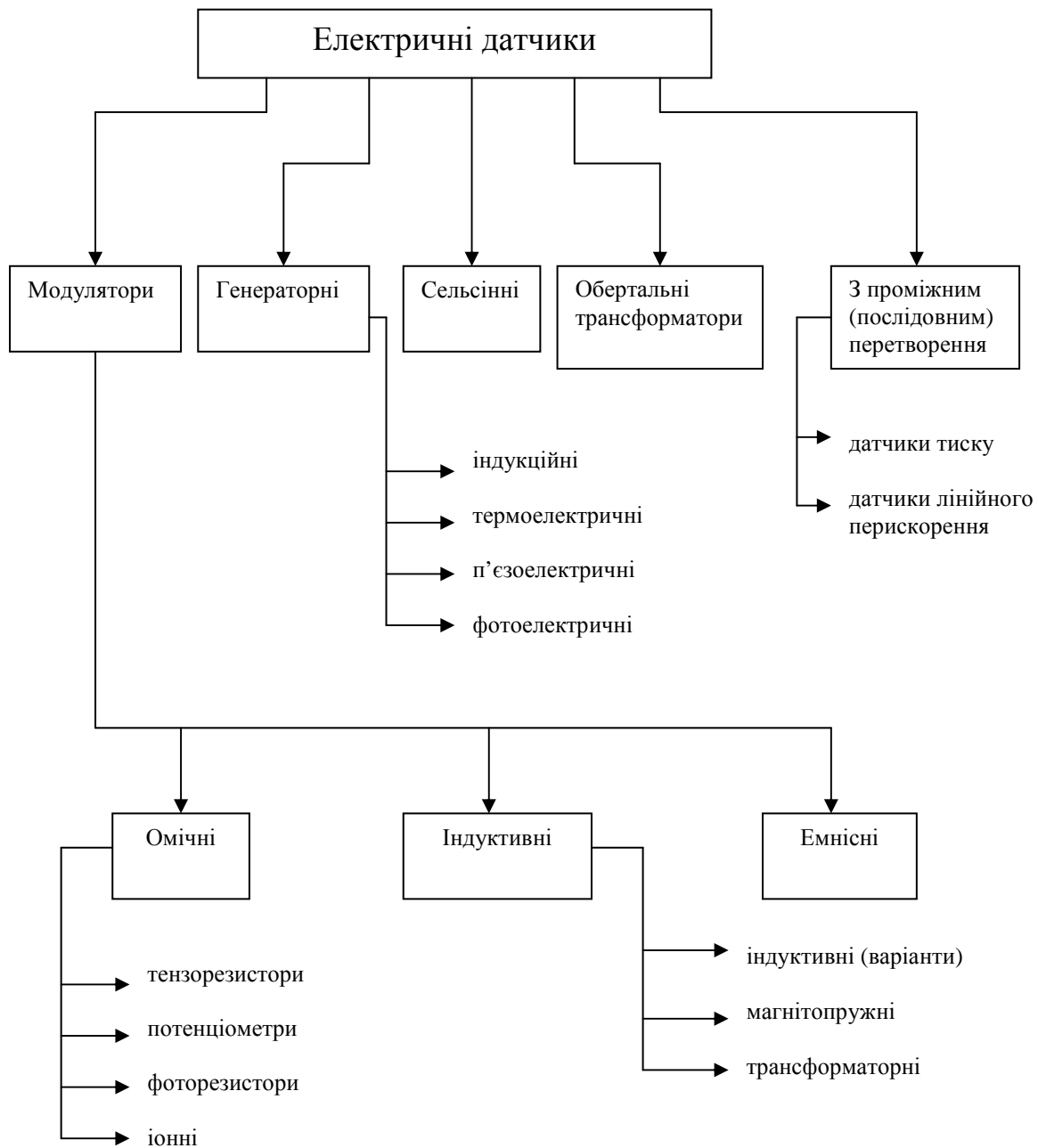


Рис. 2.2. Схема класифікації основних електричних датчиків

Чутливість датчика в точці А статичної характеристики визначається так:

$$K_A = \lim_{\Delta X_A \rightarrow 0} \Delta Y_A / \Delta X_A.$$

Для практичного визначення чутливості датчика у певній точці статичної характеристики, поданої графічно, слід провести дотичну до цієї точки, задатись приростом аргументу (ΔX_A), визначити величину приросту ординати дотичної (ΔY_A) і знайти відношення $K_A = \Delta Y_A / \Delta X_A$.

Для визначення середньої чутливості датчика у заданому діапазоні MN статичної характеристики необхідно знайти різницю між ординатами кінців діапазону MN і поділити її на величину діапазону MN, тобто

$$K_{\text{ср.}} = (Y_N - Y_M) / (X_N - X_M) = \Delta Y_{MN} / \Delta X_{MN},$$

де ΔY_{MN} – різниця між ординатами точок M і N,

ΔX_{MN} – різниця між абсцисами точок M і N (величина діапазону MN).

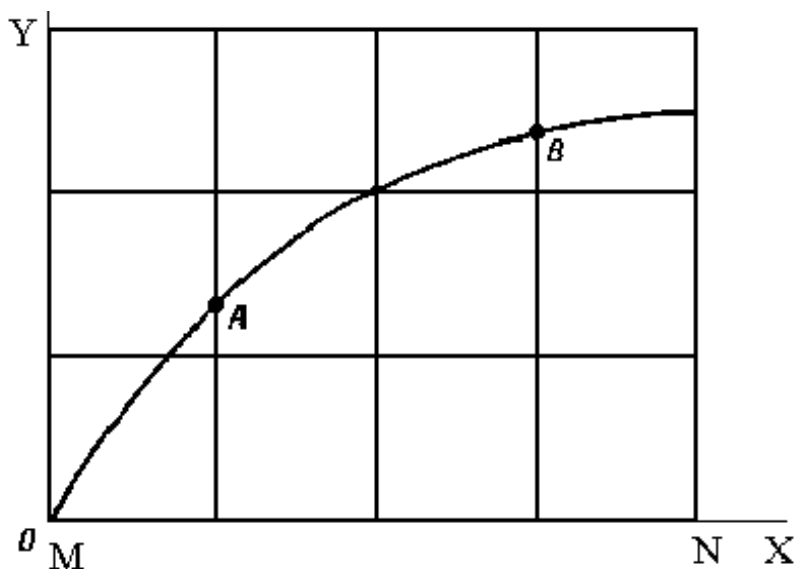


Рис. 2.3. Статична характеристика датчика

Для визначення ступеня нелінійності статичної характеристики у заданому діапазоні з'єднують точки на кінцях діапазону прямою лінією. Визначають абсцису максимального відхилення реальної характеристики від ідеальної (лінійної). Знаходять різницю між ординатами реальної та ідеальної (лінійної) характеристик в обраній точці ($Y_p - Y_i$) і визначають ступінь нелінійності статичної характеристики у відсотках:

$$\xi = [(Y_p - Y_i) / Y_p] \cdot 100 \%$$

Важливе значення мають такі параметри датчиків, як *діапазон виміру*, *поріг чутливості*, *похибка*, *гістерезис* та інші.

Діапазон виміру означає, що вимірювана величина повинна знаходитися в межах цього діапазону.

Поріг чутливості – це найменше значення вхідного сигналу, яке може викликати помітну зміну вихідного сигналу. Інтервал, у якому вхідна величина менша порога чутливості, називається зоною нечутливості.

Похибки вимірювань з'являються через неточне тарування або градування, зміни внутрішніх властивостей (старіння, знос) або вплив зовнішніх факторів (температура, напруга). Похибки поділяють на абсолютні, відносні та зведені.

Абсолютна похибка – це різниця між одержаним Y_0 та дійсним Y значеннями вимірюваної величини, тобто $\Delta = Y_0 - Y$. Абсолютна похибка має розмірність вимірюваної величини.

Відносна похибка – це відношення абсолютної похибки до дійсного значення вимірюваної величини, тобто:

$$\delta_0 = \Delta/Y \quad \text{або} \quad \delta_0 = (\Delta/Y) \cdot 100 \%$$

Відносна похибка має розмірність відносних одиниць або відсотків. Відносна похибка дає більш повне уявлення про нестабільність статичної характеристики.

Зведена похибка – це відношення абсолютної похибки до величини діапазону вимірювань, тобто:

$$\delta = \Delta/(Y_{\max} - Y_{\min}) \quad \text{або} \quad \delta = [\Delta/(Y_{\max} - Y_{\min})] \cdot 100\%$$

Зведена похибка має розмірність відносної.

Динамічні характеристики та параметри

Для САУ основним режимом роботи є режим, коли вхідні та вихідні величини змінюються за часом. Такий режим називається динамічним.

Для оцінки роботи САУ в динамічному режимі використовують динамічні характеристики і параметри. Процес переходу САУ з одного усталеного стану в другий називають перехідним процесом. Перехідний процес характеризується перехідною характеристикою, яка може бути безінерційною, аперіодичною, періодичною з загасанням або періодичною із зсувом фази (мал. 2.4 – 2.7).

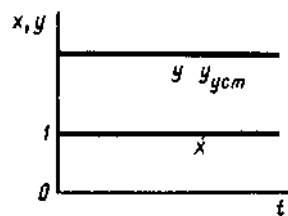


Рис. 2.4. Безінерційний перехідний процес

Безінерційний перехідний процес характеризується тільки коефіцієнтом підсилення.

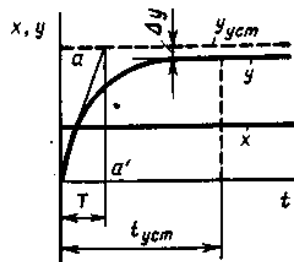


Рис. 2.5. Аперіодичний перехідний процес

Аперіодичний перехідний процес характеризується постійною часу та часом перехідного процесу.

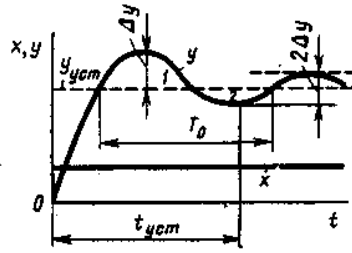


Рис. 2.6. Періодичний процес з загасанням

Періодичний процес з загасанням має період загасання T_0 , величину перегулювання ΔY і число коливань n .

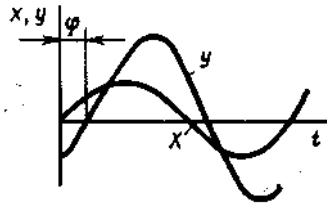


Рис. 2.7. Періодичний процес із зсувом фаз

Періодичний процес із зсувом фаз характеризується величиною зсуву фази φ .

Контрольні питання

1. Види сприймаючих елементів?
2. Класифікація датчиків за вхідною величиною?
3. Визначення датчиків-модуляторів та приклади цих датчиків?
4. Головний принцип дії датчиків генераторів та приклади цих датчиків?
5. Класифікація основних електричних датчиків?
6. Визначення статичної характеристики датчиків?
7. Основні параметри статичної характеристики датчиків?
8. Визначення чутливості в точці?
9. Визначення середньої чутливості у заданному діапазоні?
10. Що таке діапазон виміру?
11. Що таке поріг чутливості?
12. Що таке абсолютна похибка?
13. Що таке відносна похибка?
14. Що таке приведена похибка?
15. Визначення динамічного режиму?
16. Види перехідних характеристик?

ЛЕКЦІЯ 3. Мостові вимірювальні схеми. Омичні і тензOMETричні датчики.

Мостові вимірювальні схеми

Мостові вимірювальні схеми дуже поширені у системах автоматичного управління та в різноманітних вимірювальних схемах. Мостові вимірювальні схеми здатні працювати як на постійному, так і на змінному струмі. Залежно від того, на яких елементах будуються мостові схеми, прийнято розрізняти резистивні, ємнісні та індуктивні мостові вимірювальні схеми. Усі ці різновиди вимірювальних схем використовуються для найбільш точного вимірювання параметрів чутливих елементів.

У загальному вигляді мостовою схемою називають електричне коло, чотиріполюсник або багатополусник, коефіцієнт передачі якого за виконання деяких умов дорівнює нулю. Ці умови називають умовами балансу або рівноваги мосту. Гілки електричного кола, опір яких входить в умови рівноваги, називають плечами мосту. Залежно від кількості плечей, що становлять схему мосту, розрізняють чотиріплечові, шестиплечові та ін. мости. У тому випадку, коли вимірювання здійснюється за допомогою змінного струму, умови рівноваги мосту пов'язані з комплексним опором плечей. Коли до рівняння балансу мосту змінного струму не входить частота, прийнято казати про частотнезалежні мости. Схема найбільш поширеного одинарного чотиріплечового мосту показана на рис. 3.1, де $Z_1 \dots Z_4$ – плечі мосту, AB – діагональ живлення, CD – індикаторна діагональ мосту. Баланс мостової схеми характеризується відсутністю напруги між точками C і D за наявності напруги в точках A і B . Напруга на опорі Z_3 у момент балансу дорівнює напрузі на Z_4 , тобто $I_1 Z_3 = I_2 Z_4$.

Значення струмів $I_1 = \frac{U}{Z_1 + Z_3}$ і $I_2 = \frac{U}{Z_2 + Z_4}$, звідки виходить $\frac{Z_3}{Z_1 + Z_3} = \frac{Z_4}{Z_2 + Z_4}$, або $Z_2 Z_3 + Z_4 Z_3 = Z_1 Z_4 + Z_3 Z_4$. Остаточне рівняння балансу чотиріплечового мосту записується так: $Z_2 Z_3 = Z_1 Z_4$, (1)

тобто добуток опорів протилежних плечей мосту рівні між собою.

Враховуючи те, що плечі мосту – комплексні опори, тобто $Z = R + jX = z e^{j\varphi}$, рівняння (1) можна записати у вигляді $z_2 z_3 e^{j(\varphi_2 + \varphi_3)} = z_1 z_4 e^{j(\varphi_1 + \varphi_4)}$, звідси $z_2 z_3 = z_1 z_4$ і $\varphi_2 + \varphi_3 = \varphi_1 + \varphi_4$, добуток модулів опорів та сума величин фазових зсувів протилежних плечей мостової схеми дорівнюють один одному.

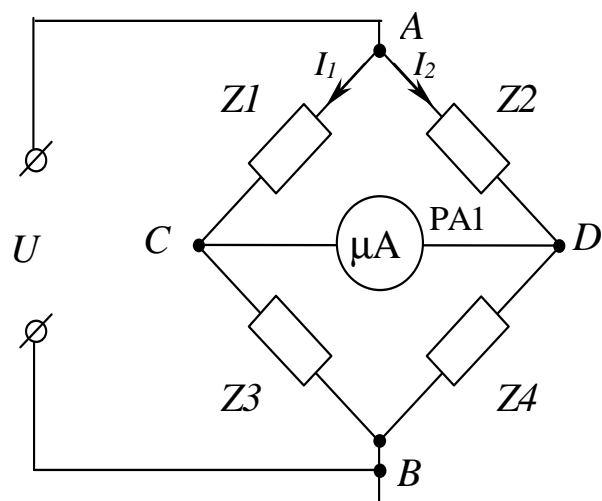


Рис. 3.1. Схема чотириплечевого мосту

Одним з показників що характеризують мостову схему, є чутливість мосту. Припустимо, що опір одного плеча мосту змінився на величину ΔZ . Позначимо через $\Delta u_{\text{в}}$ зміну напруги у вимірювальній діагоналі, яка визивається зміною опору плеча мосту. Відношення $S_{\text{сер}} = \frac{\Delta u_{\text{в}}}{\Delta Z}$ називають середньою чутливістю мосту, а ліміт цього рівняння при $\Delta Z \rightarrow 0$ називають чутливістю мостової схеми у точці Z : $S = \lim_{\Delta Z \rightarrow 0} (\Delta u_{\text{в}} / \Delta Z)$. Чутливість мостової схеми збільшується разом із збільшенням чутливості вимірювального приладу та разом із збільшенням напруги живлення мосту.

Для вимірювання активного опору або для компенсації температурних перешкод під час підключення термоелектричних перетворювачів використовуються мости активних опорів. До одного плеча мостової схеми підключається резистор або первинний перетворювач, опір якого наперед невідомо. Наприклад: $Z_4 = R_x$. У момент балансу мосту (коли вимірювальний прилад показує нульові значення струму) відповідно до рівняння балансу мосту можна визначити опір R_x за формулою

$$R_x = R_2 \cdot R_3 / R_1.$$

Плеце, до якого входить резистор R_2 , називають плечем порівняння, а плечі, до яких входять резистори R_3 та R_1 , називають плечами відношення.

Похибки вимірювання параметрів елементів за допомогою мостових схем залежать від якості виготовлення зразкових резисторів та чутливості вимірювального приладу. Чутливість приладу можна збільшити під час використання електронних підсилювачів.

У деяких випадках використовуються розбалансовані мости. У цих мостах по вимірювальній діагоналі проходить струм. Величина струму залежить від напруги живлення, опору вимірювального приладу та величини розбалансу мосту. Цей метод має більшу похибку вимірювань і

тому не дуже часто використовується у контрольно–вимірвальних приладах.

Датчики – модулятори

Омічні (потенціометричні) датчики

Потенціометричні датчики (реостатні) застосовуються для вимірювання кутових або лінійних переміщень і перетворення цього розміру на зміну опору. Конструктивно датчики такого типу являють собою каркас 1 прямокутної або кільцевої форми, на який намотано в один ряд тонкий дріт (рис. 3.2 а). По витках дроту 4 ковзає щітка 3, яка називається движком потенціометра і механічно зв'язана з об'єктом, переміщення якого потрібно виміряти.

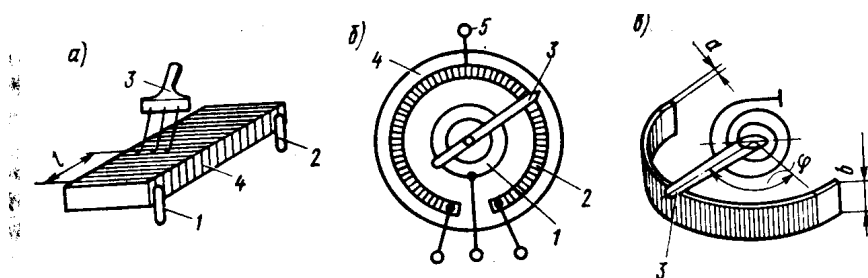


Рис. 3.2. Принципова конструкція потенціометричного датчика:
а – прямокутного; б – кільцевого; в – секторного дрових

Від кінців намотки і від движка зроблено електричні виводи 1, 2, 3, за допомогою яких датчик включають у схему. При переміщенні движка потенціометра від виводу 1 до виводу 2 щітка переходить з одного витка намотки на інший. При цьому довжина дроту між движком і виводом 1 збільшується, а між движком і виводом 2 зменшується. За рахунок цього опір між виводами 3 і 1 збільшується від 0 до R , а між виводами 2 і 3 зменшується від R до 0, де R – опір дроту, намотаного на каркас. По зміні цих опорів можна визначити переміщення L . Аналогічно виконані потенціометри (рис. 3.2 б, в).

Опір між движком і одним із виводів (наприклад, 5) намотки називають вихідним опором датчика $R_{вих}$. При переміщенні щітки в межах одного витка $R_{вих}$ не змінюється, що обумовлює зони нечутливості, а при переході щітки з одного витка на іншій $R_{вих}$ змінюється стрибком. Для зменшення стрибків і зон нечутливості при намотці використовують тонкий дріт (діаметром 0,03 – 0,05 мм).

З метою зниження впливу температури на $R_{вих}$ застосовують дріт з малим температурним коефіцієнтом опору (ніхром, константан, манганін). Найчастіше застосовують лінійні потенціометри, у яких переріз каркаса по всій довжині однаковий, а намотка рівномірна. За рахунок цього вихідний опір датчика $R_{вих}$ лінійно залежить від переміщення L , тобто $R_{вих} = CL$, де C – коефіцієнт пропорційності (рис. 3.3).

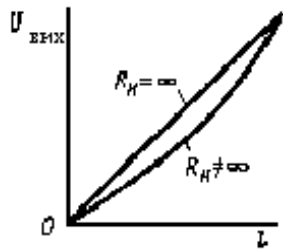


Рис. 3.3. Залежність вихідної напруги від зміни опору

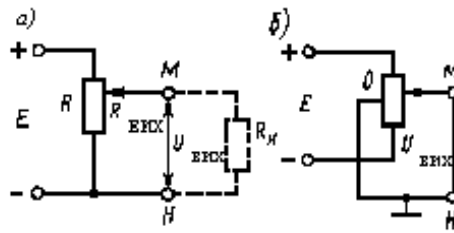


Рис. 3.4. Схеми вмикання потенціометричних датчиків

Існує декілька варіантів вмикання потенціометричних датчиків (рис. 3.4 а, б). Живильна напруга E (рис. 3.4 а) підводиться до виводів намотки. Для лінійного потенціометра вихідна напруга знімається з виводів $M - H$:

$$U_{вих} = (E/R)R_{вих}.$$

Для зручності використання даної формули візьмемо

$E/R = K$ – коефіцієнт датчика.

При підключенні до датчика навантаження R_n через його шунтуючу дію лінійна залежність вихідної напруги від переміщення движка потенціометра порушується. Щоб порушення лінійності було незначним, повинно бути $R_n \gg R$ (у 20 разів більше).

Застосовуються також потенціометричні датчики з виводом від середньої точки (мал. 3.4 б). При переміщенні движка в одному напрямку від середньої точки на виході датчика з'являється напруга позитивної полярності, а при переміщенні в іншу сторону від середньої точки – негативної полярності. За полярністю вихідного сигналу можна судити про напрямок переміщення.

Переваги потенціометричного датчика: висока точність перетворення, простота конструкції, можливість живлення постійним і змінним струмом, безінерційність.

Омічні (тензометричні) датчики

До датчиків з мінливим омичним опором належать тензометричні датчики, що застосовуються для вимірювання пружних деформацій (вимірювання розтягу або стиску тіл, а також для виміру моментів крутіння і вигинання), виникаючих на поверхні різних деталей при їхньому механічному навантаженні. Значення вимірюваної деформації дозволяє за допомогою відомих формул теорії пружності і пружних констант (постійних значень) матеріалу деталей обчислювати механічні напруги в них і судити про придатність їхньої конструкції. Тензодатчики, використовувані в автоматичному контролі, дають можливість стежити за деформаціями і напругами при статичних і динамічних навантаженнях.

Основним елементом дротового тензодатчика є константовий дріт

діаметром 0,015 – 0,05 мм, складений у вигляді петель (спіралі) між двома склеєними смужками тонкого паперу або плівки (мал. 3.5). Датчик 1 через спеціальний папір 2 приклеюється до деталі 3, деформацію якої потрібно виміряти. При дії деформації, наприклад при розтягу, як показано на мал. 3.5 суцільною стрілкою, разом із деталлю буде розтягуватися і дріт. При цьому його довжина L збільшиться, а переріз S зменшиться. За рахунок цього опір дроту $R = \rho L/S$ збільшиться. Цей опір є вихідним сигналом датчика. Якщо деформація буде діяти, як показано на мал. 3.5 пунктирною стрілкою, то дріт на вигинах ще більше зігнеться. При цьому ні довжина, ні товщина дроту не зміняться. Отже, не буде змінюватися опір датчика. Деформацію такого напрямку датчик не вимірює.

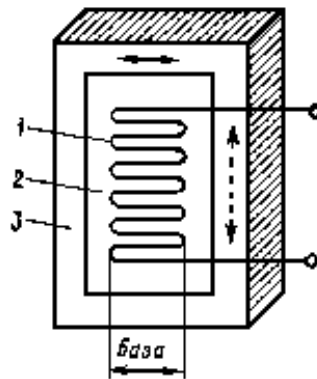


Рис. 3.5. Дротовий тензодатчик

Для тензодатчиків, що випускаються промисловістю, використовується константановий або фехралевий дріт. Опір таких датчиків становить 50 – 2000 Ом, база – 5 – 30 мм, номінальний робочий струм при клеєнні на металеві деталі – 30 мА, припустимі відносні деформації – не більш 0,3 % (при більшій деформації дріт обірветься), максимальна робоча температура – 500°C (для датчиків з плівковою основою). Переваги дротових тензодатчиків: простота конструкції, практична безінерційність; недолік – мала чутливість (при роботі опір тензодатчика змінюється не більш ніж на 0,3 %). З метою виключення залежності тензодатчика від температури застосовують мостові схеми з двома тензодатчиками в суміжних плечах моста, з яких один не піддається деформації, але знаходиться в тих же температурних умовах. Це досягається перпендикулярним розташуванням обох датчиків. Тоді температурні зміни опору врівноважуються і баланс схеми зберігається (рис. 3.6).

Вимірювальний або реєстраційний прилад звичайно включається через підсилювач. Похибка вимірів із застосуванням дротових тензодатчиків знаходиться в межах $1 \pm 0,5$ %.

Розроблено також напівпровідникові тензодатчики, чутливість яких у 50 – 60 разів вища, ніж у дротових. Їх недоліки – мала механічна міцність, вплив освітлення, розкид параметрів у різних зразках.

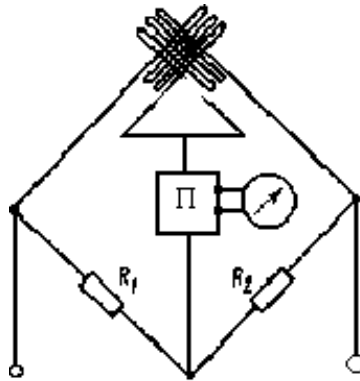


Рис. 3.6. Мостова схема вмикання тензодатчиків (П – підсилювач)

Перетворювачі тиску-сили

Одним із принципів, найбільш широко застосовуваних для створення *перетворювачів тиску і сили*, є принцип *тензодатчика*. При витягуванні металевого проводу його довжина збільшується, а поперечний перетин зменшується. Оскільки опір проводу прямо пропорційний його довжині і обернено пропорційний його перерізу S ($R = pl/S$), при натягу дроту він збільшується. Таким чином, тут відбувається перетворення, яке перетворює лінійний зсув в опір. На рис. 3.7 а показано дріт до і після прикладання до нього сили $F1$ (за рахунок вантажу W). Зміну опору можна розрахувати за даними зміни поперечного перерізу і довжини проводу:

$$R_1 = \frac{L_1 p}{S_1}, \quad R_0 = \frac{L_0 p}{S_0} \quad (p - \text{питомий опір}),$$

$$\frac{R_1}{R_0} = \frac{L_1}{L_0} * \frac{S_0}{S_1}, \quad R_1 = R_0 \frac{L_1}{L_0} * \frac{S_0}{S_1}.$$

Наприклад, при зміні довжини на 1% і поперечного перетину на 1% будемо мати $L_1 = 1,01L_0$ (збільшення довжини на 1%), $S_1 = 0,99S_0$ (зменшення поперечного перетину на 1%),

$$R_1 = R_0 \frac{1,01L_0}{L_0} * \frac{S_0}{0,99S_0} = 1,02R_0 \text{ (збільшення опору на 2\%).}$$

Розроблено різні способи збільшення зміни опору на одиницю прикладеної сили. Однак ми маємо справу з дуже малими змінами опору.

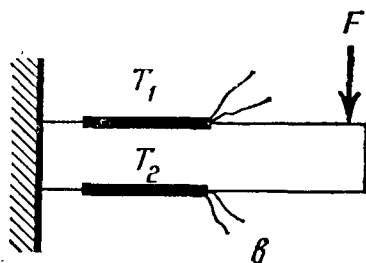
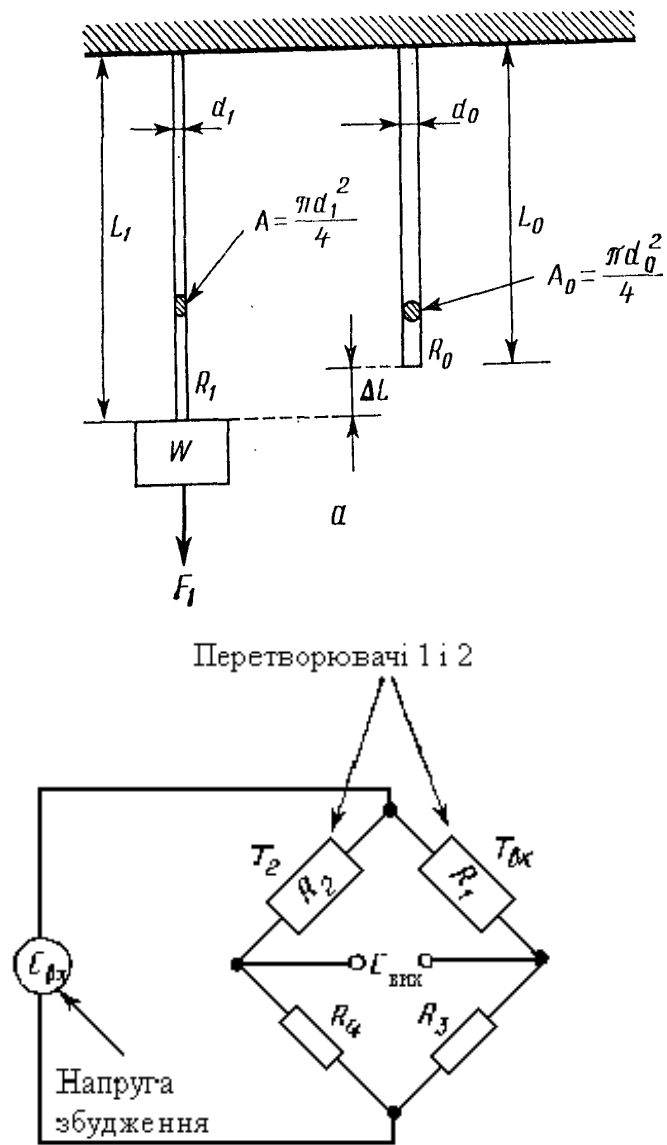


Рис. 3.7. Принцип дії та електрична схема тензодатчиків
 а – принципи дії тензодатчика, ΔL – зміна довжини, d_0 – початковий діаметр, d_1 – кінцевий діаметр, L_0 – початкова довжина, L_1 – кінцева довжина, W – маса що створює вагу F_1 ;

б – схема тензодатчика; *в* – тензодатчик на консольній опорі.

Такі невеликі відхилення опору, що відображають зміни прикладеної сили, звичайно вимірюються за допомогою містка Уїтстона. Чутливість тензодатчика залежить від того, наскільки велику зміну опору одержимо при даній зміні довжини. Це, у свою чергу, є характеристикою застосовуваного матеріалу і конструкції. Можна характеризувати якість матеріалу в розмірах коефіцієнта тензочутливості (к. т.):

$$\text{К. т.} = (\Delta R/R) / (\Delta L/L).$$

У наведеному вище прикладі

$$\Delta L/L = 1 \% = 0,01, \quad \Delta R/R = 2 \% = 0,02, \quad \text{к. т.} = 0,02/0,01 = 2.$$

Силу або тиск можна вимірювати шляхом механічного контакту джерела сили з тензодатчиком. Динамометричний датчик, призначений для виміру вагових навантажень, являє собою металевий стрижень із тензодатчиком на ньому, стиснутий вагою вантажу. Зміна довжини стрижня передається тензодатчику і вимірюється за пропорційною зміною опору тензодатчика. Зазначимо, що зміна довжини стрижня залежить від прикладеної сили і типу металевого стрижня.

Стрижень вибирають таким, щоб одержувати зміну довжини, яка підходить для конкретного застосування приладу. Послідовність дій така: сила, прикладена до стрижня, викликає пропорційне збільшення довжини стрижня, який з'єднаний з тензодатчиком, що, у свою чергу, призводить до розтягу еталонного дроту тензодатчика і, отже, до збільшення опору тензодатчика пропорційно прикладеній силі. Типова схема з застосуванням двох тензодатчиків показана на рис. 3.7 б. Два тензодатчики працюють у мостовій схемі. Вони змонтовані таким чином, що прикладена сила, яку потрібно виміряти, викликає збільшення опору перетворювача $T1$ ($R1$), пропорційно дії сили, а опір перетворювача $T2$ ($R2$) зменшується пропорційно дії тієї ж сили. Простий спосіб одержання цього механізму протилежно спрямованої дії показаний на рис. 3.7 в. Сила F прагне стиснути $T2$, зменшуючи його опір; у той же час F прагне розтягти $T1$, збільшуючи його опір.

В інших перетворювачах використовується пружина, що розтягується пропорційно прикладеній силі. Розтяг – лінійний зсув – потім перетвориться в електричний параметр. Простий спосіб вимірювання цього зсуву схематично показано на рис. 3.8. Сила тягне пружину вниз. Лінійний рух пружини переміщує движок лінійного потенціометра. Є також перетворювачі сили, принцип дії яких ґрунтується на використанні залежності між силою і відхиленням консольної (забитої одним кінцем) балки (рис. 3.9). Тут теж необхідно перетворювати лінійний зсув в електричний параметр.

Чутливість перетворювача – характеристика, важлива для визначення розміру необхідного коефіцієнта підсилення. Однак чутливість звичайно залежить не тільки від самого тензодатчика, але й від розміру

використовуваної напруги живлення.

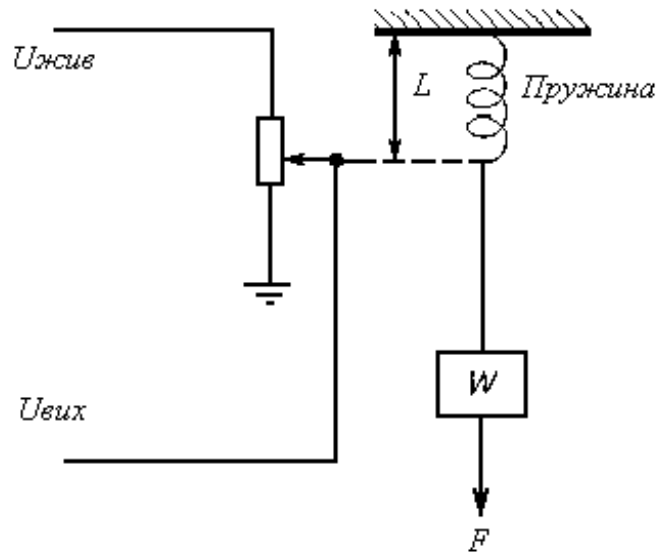


Рис. 3.8. Перетворювач сили з використанням лінійного зсуву
 W – сила F , що створює вагу;
 L – довжина пружини (пропорційна F);
 $U_{вих}$ – вихідна напруга (пропорційна L і F).



Рис. 3.9. Відхилення консольної штанги під дією сили. Принцип дії
 ΔS – лінійне відхилення в одиницях
 F – сила.

Контрольні питання

1. З яких елементів складається схема вимірювального мосту?
2. Які типи вимірювальних мостових схем існують?
3. Які мостові схеми можуть живитися як постійним так і змінним струмом, а які тільки змінним?
4. Які умови рівноваги частотно незалежних мостів?
5. Які умови рівноваги частотно залежних мостів?
6. Призначення та основні типи конструкцій потенціометричних датчиків?
7. Схеми вмикання потенціометричних датчиків?
8. Призначення та конструктивні особливості тензометричних датчиків?
9. Компенсація залежності опору тензодатчика від температури?

ЛЕКЦІЯ 4. Акустичні перетворювачі. Модуляторні та генераторні перетворювачі температури. Фотоелектричні перетворювачі, фотореле

Акустичні перетворювачі (мікрофони)

Мікрофон перетворює акустичну енергію – коливання тиску – в електричну енергію. Здійснювати це перетворення можна декількома способами.

В *електродинамічному мікрофоні* для цієї мети використовується магнітне поле. Під час переміщення котушки в магнітному полі в ній збуджується напруга змінного струму. З рухливою котушкою, яка оточена постійним магнітом, механічно зв'язана мембрана (рис. 4.1). Мембрана і котушка підвісні, це дозволяє їм рухатися вперед і назад. Коливання звукового тиску зміщують мембрану до магніту, пересуваючи котушку поперек магнітного поля, яке збуджується магнітом. Напруга, що виникає між затискачами котушки, є прямий результат її руху і залежить від сили звукових коливань.

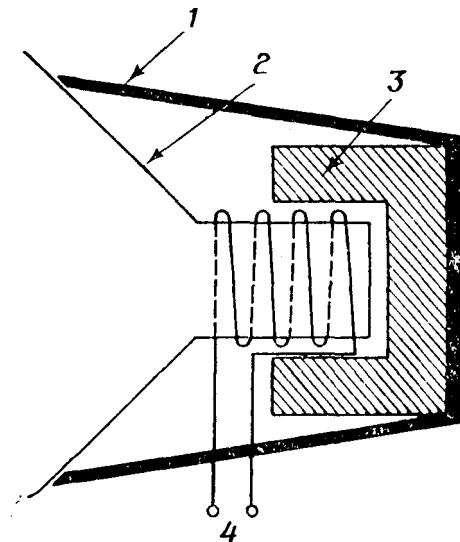


Рис. 4.1. Електродинамічний мікрофон.

1 – корпус; 2 – підвісна мембрана і котушка; 3 – магніт; 4 – виводи котушки

У *порошковому вугільному мікрофоні* акустичні коливання використовуються для стиску вугільного порошку. Електричний опір вугільного порошку змінюється залежно від тиску, що прикладається до порошку. Одержуємо коливання опору, пропорційні звуковому тиску. Коливання опору можна перетворити на змінний (із звуковою частотою) струм, живлячи мікрофон від джерела постійної напруги. Зміни опору, що викликаються звуковими коливаннями, роблять зміни сили струму, що прямо пов'язані зі звуком.

Дія *п'єзоелектричного мікрофона* ґрунтується на використанні п'єзоелектричного ефекту. Коли уздовж однієї з координатних осей п'єзоелектричного кристала додається сила стиску, уздовж іншої його осі

виникає електрична напруга. Коливання звукового тиску породжують змінну силу стиску уздовж однієї осі п'єзокристала. Змінна напруга, що виникає уздовж іншої його осі, також прямо пов'язана зі звуковими коливаннями.

У конденсаторному мікрофоні тиск звукових коливань використовується для переміщення однієї з пластин-електродів у плоскому конденсаторі. Оскільки ємність залежить від відстані між пластинами, одержуємо коливання ємнісного опору, пропорційні коливанням звукового тиску.

Для здійснення перетворення у цих мікрофонах використовуються цілком різні фізичні явища. В електродинамічному мікрофоні використовується явище магнітної індукції. У порошковому вугільному мікрофоні зміни опору пов'язані з тим, що опір порошку падає при його стискуванні. Для п'єзоелектричного мікрофона використовується п'єзоелектричний ефект, а в конденсаторному мікрофоні виникають коливання ємнісного опору. Ці ж фізичні явища можуть використовуватися і в багатьох інших типах перетворювачів для переведення багатьох інших неелектричних величин в електричні.

Модуляторні вимірювачі температури

Термометричні датчики (термістори), або терморезистори, призначені для вимірювання температури шляхом перетворення вимірювального сигналу на зміну активного опору. Термістори бувають металеві і напівпровідникові.

Металеві термістори виготовляються з чистих металів з великим температурним коефіцієнтом опору (мідь, платина). Діапазон вимірювальних температур платинових термісторів від -200 до 600°C , мідних – від -50 до 150°C . Точність вимірювання платинових термісторів $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$, мідних – до $\pm 1^{\circ}\text{C}$. При більш високих температурах термістори не застосовуються, тому що в діапазоні високих температур вони мають недостатню точність і сильно окиснюються.

Залежність опору металевих термісторів майже лінійна:

$$R_t = R_0[1 + a(t - t_0)],$$

де a – температурний коефіцієнт опору; R_0 – опір при t_0 Ом; t_0 – початкова температура, $^{\circ}\text{C}$; t – вимірювальна температура, $^{\circ}\text{C}$.

Лінійність статичної характеристики в інших діапазонах температур порушується.

Залежно від призначення термістори мають різну конструкцію. Вони виготовляються у вигляді нитки, спіралі, котушки тощо. Останнім часом термістори знайшли широке застосування для температурного контролю обмоток різних виконавчих механізмів (електродвигунів, котушок і ін.).

Термістори мають один істотний недолік: вони відзначаються великою інерційністю. Постійна часу термісторів змінюється від одиниць до десятків секунд і залежить від діаметра дроту.

Напівпровідникові термістори виготовляються з окису різних металів (марганцю, міді, нікелю, титану та ін.). Вони мають негативний температурний коефіцієнт опору, це означає, що зі збільшенням температури опір напівпровідника зменшується. Найширше напівпровідникові термістори використовують у діапазоні температур від -100 до 120°C .

Генераторні перетворювачі температури

Для перетворення температури може використовуватися дуже багато фізичних явищ і приладів що ґрунтуються на цих явищах, у тому числі термопара, термоелектрична батарея, термістор і терморезистор.

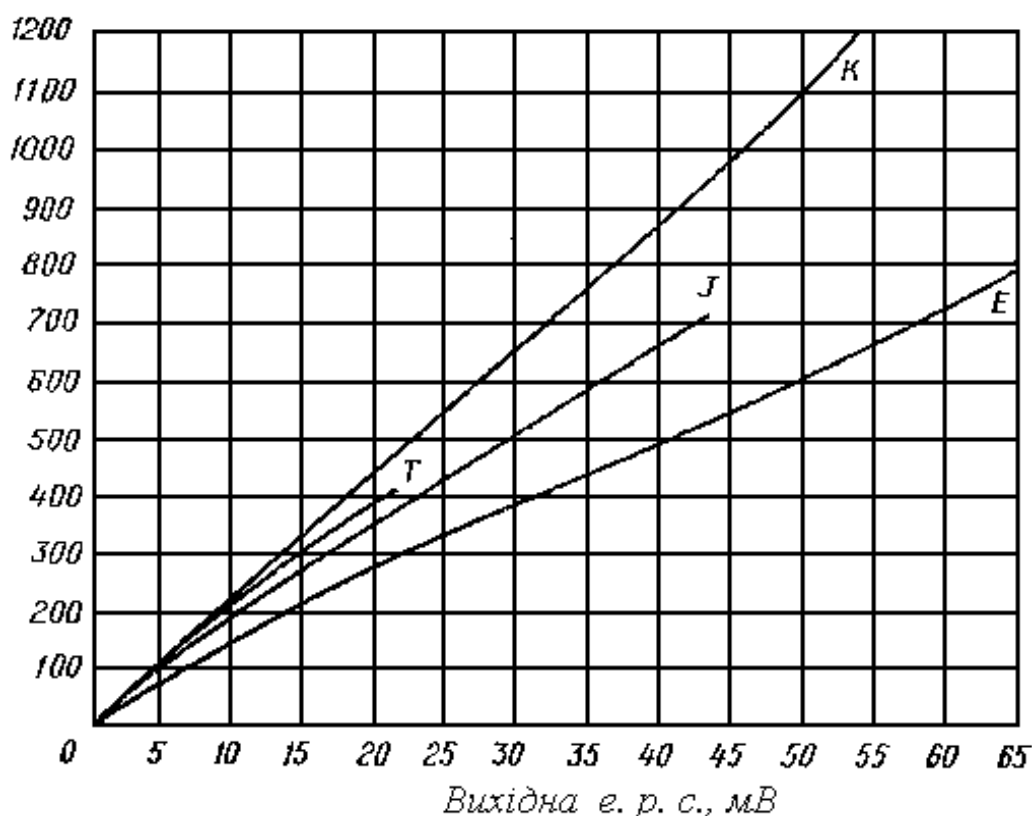


Рис. 4.3. Залежність діапазону виміру температур від вихідної напруги термопар

Низькотемпературні матеріали термопар:

Тип	Типовий матеріал термопар (Назви матеріалів позитивного полюса провідників набрано великими літерами)	Умовне фарбування
K	ХРОМЕЛЬ – алюмель	(ЖОВТИЙ – червоний)
T	МІДЬ – константан	(СИНІЙ – червоний)
J	ЗАЛІЗО – константан	(БІЛИЙ – червоний)
E	ХРОМЕЛЬ – константан	(ПУРПУРНИЙ – червоний)

Термопара – пристрій, що містить спай двох різних металів (наприклад, заліза і константану). Коли спай знаходиться під дією

температури, що змінюється, між вільними (неспаяними) кінцями двох металевих провідників виникає різниця потенціалів (е.р.с. постійного струму), яка пропорційна різниці температур спаю і вільних кінців. Збуджувана е.р.с. досить мала. Наприклад, мідьконстантанова термопара генерує близько 45мкВ на 1°С. Така мала чутливість потребує складної прецизійної підсилювальної апаратури, щоб одержувати достовірні показання напруги. Частковою альтернативою підсилення є послідовне з'єднання ряду термопар (де на всі спаї діє однакова температура), тобто утворення термоелектричної батареї (термостовпця). Якщо послідовно з'єднати 10 мідьконстантанових термопар, то одержимо чутливість 450 мкВ/°С. На рис. 4.3 наведено графік залежності напруги від температури для ряду термопар.

Обираючи термопару, необхідно враховувати не тільки чутливість, але також і температурний діапазон вимірів (рис. 4.3), а також лінійність, час відгуку і т.ін. Термопари мають дуже погану лінійність (від 10 до 25 %). Виникає необхідність індивідуально конструювати підсилювачі зі спеціальною нелінійною характеристикою підсилення, щоб компенсувати нелінійність термопари (“лінеаризаційні” підсилювачі, спроектовані для конкретних термопар).

Постійна часу термопар (час, необхідний для досягнення 63 % кінцевої повної вихідної напруги) різна залежно від конструкції, особливо від розміру спаяних провідників. Типові постійні часу знаходяться в межах від 0,25 до 1,5 с. Зауважте, що час відгуку (час, необхідний для зміни сигналу від 10 до 90 % його кінцевої величини) приблизно в 2 – 3 рази більший постійної часу. Поки вихідна напруга майже досягне кінцевої величини, що виражає температуру (з точністю краще 1 %), потрібно очікувати протягом п'ятох постійних часу. При використанні термопар у схемах без зворотнього зв'язку точність в 1 % досяжна лише у випадку, якщо можливі великі витримки часу при вимірюванні. (У більшості застосувань це так, оскільки самі зміни температури відбуваються повільно.)

Термопара, будучи перетворювачем генераторного типу, може розглядатися як джерело напруги, що залежить від температур, дуже малим вихідним опором, близьким до ідеального.

Генераторні фотоелектричні датчики та фотоелектричні реле

До фотоелектричних датчиків генераторного типу належать фотоелементи із зовнішнім фотоелементом, що на відміну від фотоелементів із внутрішнім фотоелементом (фотоопорів) під дією світла виділяють вільні електрони. Цим створюється різниця потенціалів, виникає електричний струм, тобто відбувається безпосереднє перетворення світла в електричну величину без модуляції енергії від стороннього джерела. Конструктивно фотоелементи генераторного типу бувають двох виконань – вакуумні та напівпровідникові.

Вакуумні фотоелементи виробляють сигнал (електричного струму)

невеликого розміру, і він не може безпосередньо впливати на виконавчий механізм. У цьому випадку разом з вакуумним фотоелементом застосовують електронний підсилювач.

Напівпровідникові фотоелементи (фотодіод, фототранзистор) виробляють сигнал, величина якого в ряді випадків достатня для безпосереднього впливу на вимірювальний прилад.

У даний час ширше застосовуються одержали напівпровідникові фотоелементи, тому що, крім більшого за величиною вироблюваного сигналу, вони мають порівняно з вакуумними менші габаритні розміри, більший термін служби, можливість експлуатації в місцях, що піддаються вібрації й ударам. Недоліком напівпровідникового фотоелемента є залежність його характеристик від температури навколишнього середовища (у вакуумних фотоелементах ця залежність відсутня).

Принципову схему варіанта фотодатчика, що має релейну характеристику, зображено на рис. 4.4. Якщо фотодіод D не освітлений, його внутрішній опір великий, транзистор $VT1$ закритий і реле $P1$ вимкнено. При освітленні фотодіода його внутрішній опір різко зменшується і виникає струм у ланцюзі:

+Ек – емітер – база транзистора – фотодіод $D1$ – Ек. Транзистор відчиняється, реле $P1$ вмикається. При повторному затемненні фотодіода його внутрішній опір знову різко збільшується і реле $P1$ вимикається. Діод $D2$ захищає транзистор $VT1$ від пробоя.

Фотоелектричні датчики генераторного типу знайшли широке застосування в системах автоматичного контролю: для вимірювання сили світла різних джерел, освітленості, фотометрирування ультрафіолетової радіації тощо.

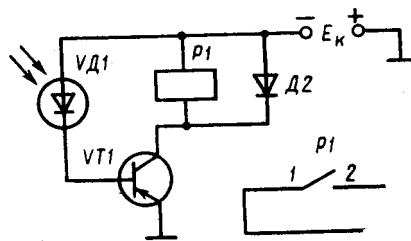


Рис. 4.4. Принципова схема фотодатчика

Шляхом фотоелектричного вимірювання радіації, яскравості або кольору розжареного тіла можна судити про його температуру. У даному випадку є послідовне перетворення температури у випромінювальну енергію і випромінювальної енергії в електричну. Такі фотоелектричні датчики називаються також оптичними пірометрами. Фактично це два датчики – оптичний і електричний. Оптичний належить до датчиків генераторного типу, тому що перетворення теплоти у випромінювання відбувається безпосередньо, без допоміжного джерела енергії.

Фотоелектричні датчики, що мають на виході електричний струм, легко перетворюються у *фотоелектричне реле* шляхом вмикання в ланцюг цього

струму електричного реле. Як реле використовуються електромагнітні або безконтактні датчики. Особливо зручні для цього тиратрони, що виконують одночасно функції підсилювачів і реле. Фотоелектричні реле також широко застосовуються в різних схемах автоматики, сигналізації, у бракуванні, сортуванні, рахунках, захисті і т. ін.

Контрольні питання

1. Призначення акустичних перетворювачів?
2. Конструкція та принцип дії електродинамічного мікрофону?
3. Принцип дії порошкового вугільного мікрофону?
4. Принцип дії п'єзоелектричного мікрофону?
5. Принцип дії конденсаторного мікрофону?
6. Які з розглянутих типів мікрофонів відносяться до перетворювачів генеруючого типу?
7. Конструкції та принцип дії модуляторних перетворювачів температури?
8. Недоліки дротових та напівпровідникових термісторів?
9. Конструкція та принцип дії перетворювачів температури генераторного типу?
10. Види фотоелектричних датчиків та їх порівняльні характеристики?
11. Поняття про фотоелектричне реле та оптичні пірометри?

ЛЕКЦІЯ 5. Кутові електромашинні перетворювачі та сельсини

Електромашинні датчики кута

Різні типи електромашинних датчиків кута об'єднує принцип дії. Власно кажучи всі вони є обертовими трансформаторами, які мають статор і ротор, первинну та вторинну обмотки, взаємна індуктивність яких є функцією кута обертання ротора, з'єднаного з об'єктом, що контролюється. Проте істотні відмінності в конструкції окремих електромашинних датчиків обумовили їх поділення на чотири типи – обертови трансформатори, індуктосини, редуктосини і сельсини.

У данній лекції розглядається кожний з цих перетворювачів окремо, хоча сельсини іноді вважають особливим видом кутового електромашинного перетворювача.

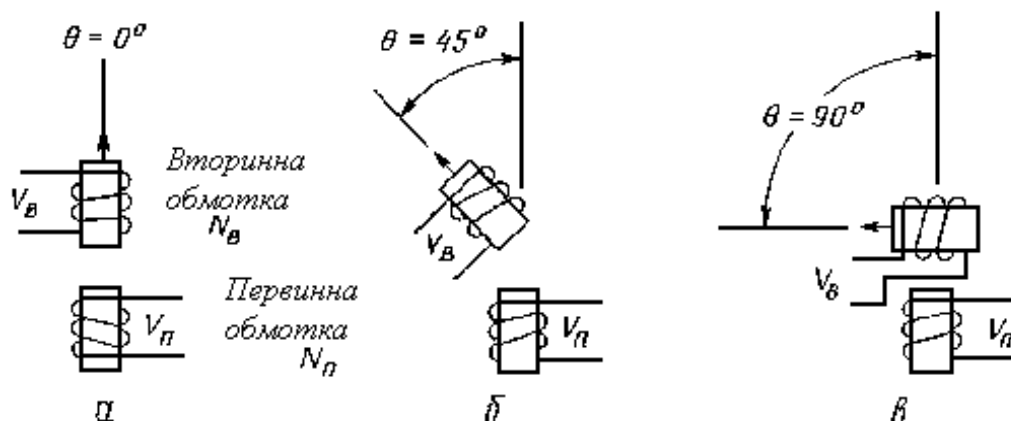
Обертовий трансформатор

Для опису принципу дії обертового трансформатора (синус-косинусного перетворювача) необхідно звернутися до теорії трансформаторних пристроїв, тому що обертовий трансформатор може класифікуватися як трансформатор з регульованим зв'язком. У трансформаторі змінна напруга, прикладена до первинної обмотки (V_n), індукує напругу у вторинній (V_v). Ці напруги пов'язані через відношення числа витків: $V_n/V_v = N_n/N_v$. (Тут

N_n/N_v – відношення числа витків первинної і вторинної обмоток.) Це припускає, однак, що коефіцієнт індуктивного зв'язку дорівнює одиниці.

Очевидно, що якби первинна і вторинна обмотки були намотані на два окремих осердя так, щоб між ними не було спільного для них магнітного потоку, то індуктивний зв'язок дорівнював би нулю. Далі, якби розташування цих двох обмоток у просторі було взаємно перпендикулярне, ми очікували б нульового коефіцієнта зв'язку.

На рис. 5.1 подано п'ять різних просторових розташувань обмоток одна щодо одної. На рис. 5.1 а, де первинна і вторинна обмотки розташовані в одну лінію, ми маємо максимальний індуктивний зв'язок. Для цілей даного аналізу візьмемо цей максимальний зв'язок за 1. На мал. 5.1 б і в первинна обмотка показана під кутом 45° і 90° до вторинної відповідно. При повороті первинної обмотки на 45° щодо вторинної індуктивний зв'язок знижується з 1 до $\cos 45^\circ$, або 0,707. Отже, напруга, що індукується у вторинній обмотці, стає нижчою на величину, обумовлену коефіцієнтом 0,707 (падає майже на 30 %). При повороті первинної обмотки на 90° до вторинної маємо нульовий зв'язок (теоретично) і, отже, нульову вихідну величину. Як показано на рис. 5.1 г, поворот на 135° дає перекидання фази і ту ж амплітуду, що при повороті на 45° . Поворот на 180° , показаний на рис. 5.1 д, дає пікову негативну амплітуду. На мал. 5.1 е подано залежність напруги вторинної обмотки від просторової орієнтації первинної і вторинної обмоток. Негативний напівперіод сигналу між 90 і 270° показує, що напруга вторинної обмотки змістилася на 180° щодо напруги первинної. Таким чином, ми маємо напругу вторинної обмотки, яку можна виразити як $V_v = V_n (N_v/N_n) \cos \theta$, де θ – просторовий кут між первинною і вторинною обмотками.



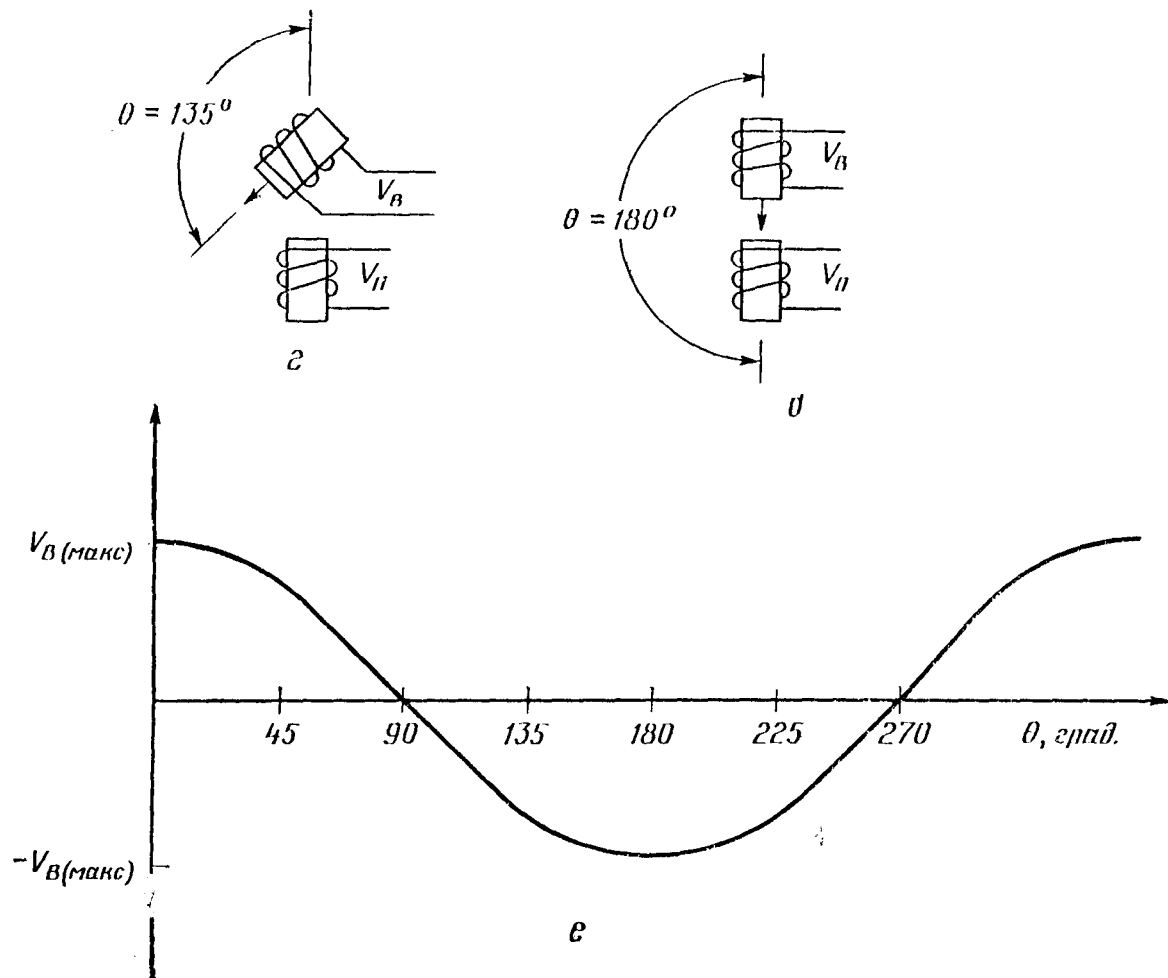


Рис. 5.1. Залежність індуктивного зв'язку від просторової орієнтації первинної і вторинної обмоток.

$a - d$ – різні просторові орієнтації (V_n , V_B – напруга первинної і вторинної обмотки відповідно; N_n , N_B – число витків первинної і вторинної обмотки відповідно); e – крива залежності напруги вторинної обмотки від кута її повороту щодо первинної.

Амплітуда напруги V_b пов'язана за синусоїдальним законом з кутом обертання θ і може використовуватися для виміру кутового зсуву.

У практичному втіленні обертовий трансформатор має дві (обертові) обмотки ротора і дві (нерухомі) обмотки статора. Обмотки розташовані з просторовим зсувом на 90° , тобто обмотки ротора перпендикулярні одна одній, так само як і обмотки статора.

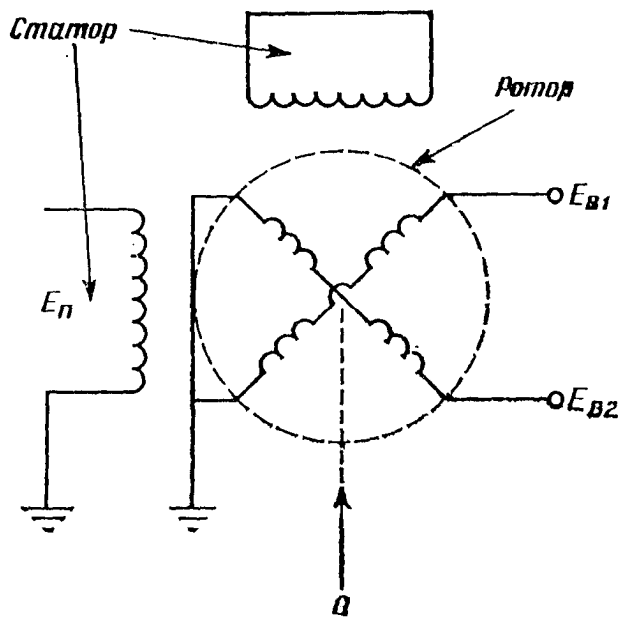


Рис. 5.2. Схема з'єднань обертового трансформатора для перетворення кутових розмірів

У цьому випадку дві напруги вторинних обмоток є функцією кутового положення і напруг двох первинних обмоток. На рис. 5.2 показано типову схему такого з'єднання. Напруги V_{B1} і V_{B2} можна виразити через V_n і θ (візьмемо, що відношення числа витків первинної і вторинної обмоток дорівнює 1):

$$V_{B1} = V_n \cos \theta, \quad (5.1) \quad V_{B1} = V_n \frac{N_B}{N_n} \cos \theta, \quad \text{де} \quad \frac{N_B}{N_n} = 1,$$

$$V_{B2} = V_n \sin \theta \quad (5.2)$$

$$V_{B2} = V_n \cos (\theta - 90^\circ).$$

Тепер можна використовувати одну або обидві ці напруги вторинних обмоток для подання кутового зсуву в електричних величинах. Зауважте, що залежність між V_{B1} або V_{B2} і θ нелінійна; вона підпорядкована синусоїдальному закону. Тим самим вимір кутів трохи утруднено.

Можна відрегулювати V_{B1} і V_{B2} таким чином, щоб одержувати напругу, електрична фаза котрої лінійно зображує кутовий зсув. Це можна зробити, увівши зсув електричної фази напруги однієї з вторинних обмоток на 90° і додаючи отриману напругу до напруги іншої вторинної обмотки. Математичний опис має такий вигляд:

$$V_n = E_n \sin \omega t,$$

де ω – кутова частота змінної напруги збудження, а E_n – амплітуда;

$$V_{B1} = V_n \cos \theta = E_n \sin \omega t \cos \theta, \quad (5.3)$$

$$V_{B2} = V_n \sin \theta = E_n \sin \omega t \sin \theta. \quad (5.4)$$

Зсунувши V_{B2} по фазі на 90° , одержимо нуль.

$$V_{B2} = E_n \sin (\omega t + 90) \sin \theta. \quad (V_{B2}, \text{ зсунуте по фазі}). \quad (5.5)$$

Виконаємо додавання:

$$V_{B1} + V_{B2} = E_n \sin \omega t \cos \theta + E_n \sin (\omega t + 90) \sin \theta = \\ = E_n [\sin \omega t \cos \theta + \sin (\omega t + 90) \sin \theta]. \quad (5.6)$$

Згадаємо, що $\sin (\omega t + 90) = \cos \omega t$, а

$$\sin (a + \beta) = \sin a \cos \beta + \sin \beta \cos a.$$

Таким чином, маємо:

$$V_{вих} = V_{B1} + V_{B2} = E_n (\sin \omega t \cos \theta + \cos \omega t \sin \theta) = E_n \sin (\omega t + \theta).$$

Електрична фаза $V_{вих}$ є θ . Міряючи зсув фази напруги $V_{вих}$, одержуємо кутовий зсув θ .

Просту схему, здатну виконувати зсув фази на 90° , наведено на мал. 5.3.

Вихідний розмір $e_{вих} = e_{вх} \cdot Rj\omega C = e_{вх}R\omega C \cdot j$; $e_{вих}$ зсунуто по фазі на 90° щодо $e_{вх}$. Коефіцієнт підсилення тут дорівнює $R \omega C$ і постійний, тому що R , C і ω – постійні розміри.

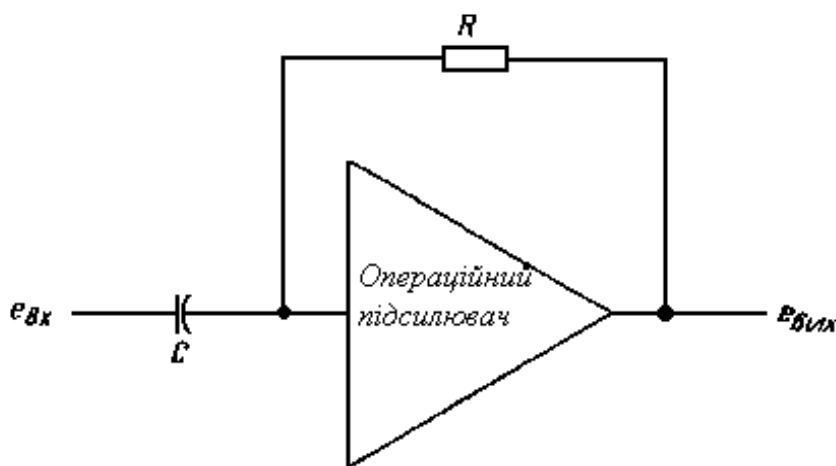


Рис. 5.3. Зсув фази на 90° за допомогою операційного підсилювача

Індуктосини

Індуктосин – це багатополюсний обертовий трансформатор з друкованими обмотками. Основним елементом у індуктосині є два диска з електроізоляційного матеріала або метала з електроізоляційним покриттям. Один з дисків (ротор) з'єднаний з валом, положення якого контролюється, а другий (статор) закріплений. Відносно один до одного диски розташовані на одній осі паралельно. На суміжні поверхні дисків нанесені друковані обмотки складені з плоских провідників. Електромагнітний зв'язок між обмотками здійснюється за рахунок магнітного потоку, який проходить крізь повітряний зазор. Індуктосини мають дуже велику точність (одиниці кутових секунд), але дуже низкий вихідний сигнал.

Редуктосини

Багатополюсний бесконтактний обертовий трансформатор – індукційний редуктосин (рис. 5.4) складається з статора, який має багато зубців і який зібрано з пластин електротехнічної сталі, та ротора, який

виконаний у вигляді зубчастого колеса з електротехничної сталі. В пази статора уміщуються три обмотки – збудження f , синусна b і косінусна a .

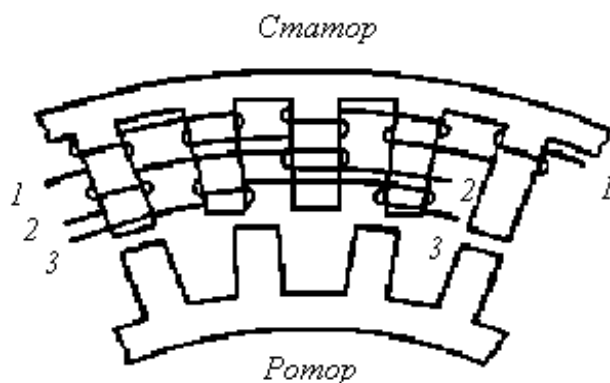


Рис. 5.4. Схема фрагменту редуктосина
1 – обмотка f ; 2 – обмотка a ; 3 – обмотка b

Обмотка збудження живиться змінним струмом, а у обмотках a і b наводяться ЕРС, амплітуди яких при обертанні ротора змінюються з періодичністю, яка кратна числу зубців ротора. Шляхом підбору ширини зубців статора і ротора, а також кута скосу пазов добиваються щоб змінення амплітуд ЕРС в обмотках a і b відбувались за косінусоїдальним та синусоїдальним законом. Безумовною перевагою редуктосинів є відсутність роторних обмоток і, відповідно, ковзних контактів, а також мала похибка ($+0,5'$) і великий вихідний сигнал (1 В при $U_{жив.}=36$ В).

Сельсини

Різновидом інформаційних електричних мікромашин призначених для використання в дистанційних системах передачі кута є сельсини.

Сельсин – це електромашинний перетворювач кута обертання з трьома обмотками статора замість двох. Обмотки статора сельсина називають трифазними; вони звичайно з'єднані "зіркою". Це до деякої міри вводить в оману, тому що сельсин працює тільки на одній фазі. Три обмотки рознесено по колу статора на 120° одна до одної, вони видають три вихідних напруги. За призначенням і влаштуванням сельсини поділяються на сельсини-датчики, сельсини-приймачі, диференціальні блоки і керувальні сельсини-трансформатори.

Сельсин-датчик видає синхронні дані спостереження (кутові дані) у трипровідну систему. Сельсин-приймач, підключений до цих ліній зв'язку, відстежує кутове обертання сельсина-датчика (рис. 5.5).

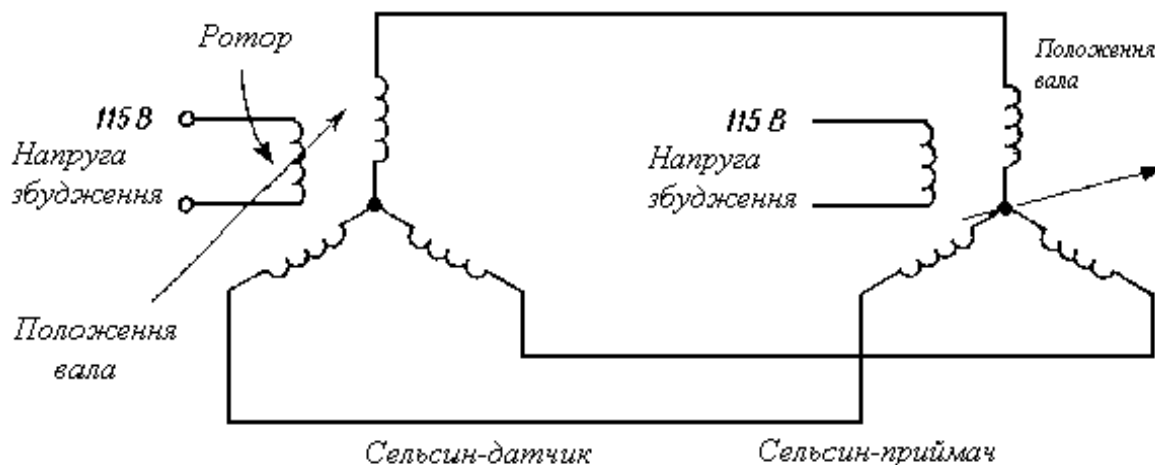


Рис. 5.5. Сельсинна система

Диференціальний блок – пристрій із з'єднаними “зіркою” котушками як статора, так і ротора. Диференціальний блок може працювати і датчиком, і приймачом. При роботі в режимі датчика одна електрична й одна механічна вхідна величина (кут повороту вала) створюють електричну вихідну величину. Ця вихідна величина являє собою або суму, або різницю двох вхідних величин залежно від застосованої схеми з'єднань.

У режимі приймача диференціальний блок видає механічну вихідну величину (кут повороту вала) на основі двох вхідних величин; одна з них – вхідна величина, що надходить до ротора, інша – до статора.

Кут повороту вала, що видається, являє собою суму або різницю електричних даних спостереження залежно від конкретної схеми з'єднань.

Керувальний сельсин-трансформатор діє як пристрій порівняння або як диференціальний підсилювач. У його конструкцію входить статор із трьома обмотками, з'єднаними у зірку, і ротор з однією обмоткою. Обмотка ротора видає вихідну напругу, що являє собою різницю між кутом повороту вала і даними електричного кута, що надходять до трьох обмоток статора. Керувальний сельсин-трансформатор застосовується як силовий привод стеження для керування кутовим положенням важких мас, наприклад антен радіолокаційних станцій і гарматних веж. Типове застосування сельсина цього різновиду показано на рис. 5.6.

Вхідною величиною є кут повороту сельсина-датчика. Статор сельсина-датчика видає синхронні дані спостереження, що надходять у керувальний сельсин-трансформатор. Вихідною величиною останнього є напруга неузгодженості, що подається різницею між вхідним кутом повороту і кутом повороту антени.

При нульовій неузгодженості ці кути збігаються і напруга неузгодженості дорівнює нулю, двигун зупиняється, спостереження закінчено. Кутове положення антени повторює положення вала сельсина-датчика.

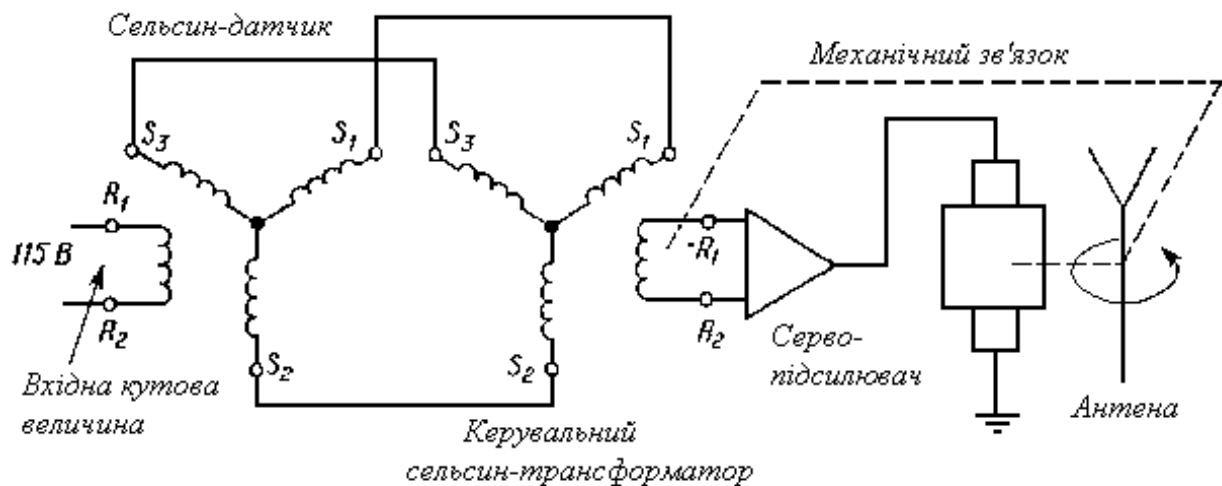


Рис. 5.6. Застосування сельсина-трансформатора для дистанційного керування кутовим положенням

Сельсин має ті ж джерела помилки, що й кутовий вирішальний пристрій. При з'єднанні блоків сельсинів спільним зв'язком сумарна помилка системи (максимальна) дорівнює сумі помилок блоків.

Оскільки робота сельсинів пов'язана з рухом значних мас, від цих пристроїв не можна очікувати швидкодії. Час відгуку в 1–2 с (реакція на вхідний східчастий сигнал повороту вала на 179°) є досить типовим.

Контрольні питання

1. Призначення та принцип дії кутового електромашинного перетворювача?
2. Конструктивні та схемні особливості обертових трансформаторів?
3. Конструктивні та схемні особливості індуктосинів?
4. Конструктивні та схемні особливості редуктосинів?
5. Конструктивні та схемні особливості сельсинів?
6. Принцип дії сельсина-датчика?
7. Принцип дії сельсина-приймача?
8. Принцип дії керуючого сельсина-трансформатора?
9. Приклади використання сельсинних систем для керування кутовим положенням важких мас?

ЛЕКЦІЯ 6. Електронні елементи систем керування

Основні поняття про операційні підсилювачі

У типових радіоелектронних системах вхідний пристрій – датчик – підключається, як правило, до підсилювача. Підсилювач же пускає в хід вихідний пристрій, яким може бути, наприклад, сервомотор. У такій

системі зі зворотним зв'язком (33) міститься підсилювач, і у стереосистемі відтворення звука теж є набір підсилювачів. Кожний з таких підсилювачів підсилює сигнал або за напругою, або за струмом, або за потужністю. Однак вони цілком не схожі один на інший.

В аналогових обчислювальних машинах для виконання математичних операцій звичайно застосовують операційні (вирішальні) підсилювачі.

Операційний підсилювач являє собою електронний підсилювач постійного струму з великим коефіцієнтом підсилення (приблизно 10^5 – 10^6) і глибоким негативним зворотним зв'язком, що дозволяє забезпечити стабільну роботу і знизити вплив дрейфу нуля. Слід зазначити, що чим вищий коефіцієнт підсилення K і менший дрейф нуля, тим вища точність операційного підсилювача.

Для зниження впливу вхідного струму $i_{вх}$ на роботу операційного підсилювача він повинен мати великий вхідний опір, а для можливості узгодження його вихідного сигналу з навантаженням – малий вихідний опір. Такий розподіл опорів дозволяє мати рівень вихідної напруги, що дорівнює нулю при $U_{вх} = 0$.

Оскільки кожний каскад операційного підсилювача змінює знак напруги, що підсилюється, на зворотний, то звичайно застосовують непарну кількість каскадів, тобто $U_{вих}$ має протилежний знак відносно $U_{вх}$, що дозволяє будувати більш гнучку схему і створювати ланцюги зворотного зв'язку (мал. 6.1), що стабілізують роботу підсилювача.

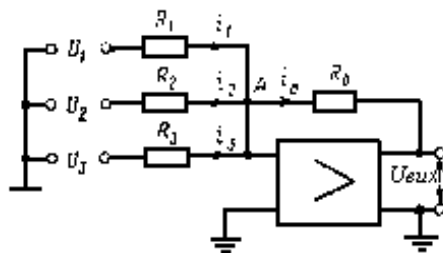
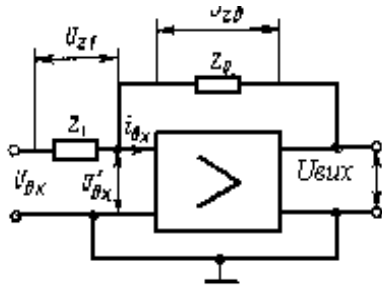


Рис. 6.1. Структурна схема операційного підсилювача Рис. 6.2. Схема суматорного підсилювача

Для підсилювача (мал. 6.1) можна записати $U_{вих} = -KU_{вх}$, де K – коефіцієнт підсилення підсилювача без зворотнього зв'язку.

Розглянемо основні властивості операційного підсилювача:

1. Для контуру, утвореного напругами $U_{вх1}$, U_{z0} , $U_{вих}$ на підставі другого закону Кірхгофа, можна записати:

$$U_{вх1} = U_{вих} + U_{z0}. \quad (6.1)$$

Оскільки $K \gg 1$, то з виразу (6.1) випливає, що $U_{вих} \gg U_{вх}$ тобто величина $U_{вх}$ значно менша величини $U_{вих}$ і нею можна знехтувати. Тоді маємо:

$$U_{вих} \approx -U_{z0}. \quad (6.2)$$

Вираз (6.2) і є першою властивістю операційних підсилювачів, що формулюється так: вихідна напруга операційного підсилювача дорівнює напрузі на елементі зворотного зв'язку Z , узятій зі зворотним знаком.

2. Для контуру з напругами U_{vx} , U_{z1} , U_{zo} , U_{vix} за другим законом Кірхгофа маємо $U_{vx} = U_{z1} + U_{zo} + U_{vix}$. Виходячи з умов, що дозволили одержати вираз (6.2), можна записати $U_{vx} \approx U_{z1}$.

Таким чином, вхідна напруга операційного підсилювача майже цілком виділяється на його вхідному елементі $z1$. Це друга властивість операційних підсилювачів.

Розглянемо основні схеми операційних підсилювачів, що реалізують дії підсумовування, інтегрування і диференціювання.

Суматорний операційний підсилювач. Схема суматорного операційного підсилювача, що підсумовує дві величини і більше, наведено на рис. 6.2. Струм I_0 , що протікає через резистор R_0 , дорівнює на підставі першого закону Кірхгофа сумі струмів, що протікають через резистори $R1$, $R2$, $R3, \dots, Rn$:

$$I_0 = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \quad (6.3)$$

Відповідно до першої та другої властивостей операційних підсилювачів можна записати $U_{vix} = -U_{R0}$; $U_1 = U_{R1}$; $U_2 = U_{R2}$; $U_3 = U_{R3} \dots$

Тоді за законом Ома знайдемо вираз для струмів:

$$I_0 = U_{R0}/R_0 = -U_{vix}/R_0; \quad I_1 = U_1/R_1 = U_1/R_1; \quad I_2 = U_2/R_2; \quad I_3 = U_3/R_3. \quad (6.4)$$

Підставивши в (6.3) значення струмів (6.4), одержимо

$$-U_{vix}/R_0 = U_1/R_1 + U_2/R_2 + U_3/R_3.$$

$$\begin{aligned} \text{Звідси } U_{vix} &= - \left(\frac{R_0}{R_1} \frac{R_0}{U_1 + R_2} \frac{R_0}{U_2 + R_3} U_3 \right) = \\ &= - (K_{n1}U_1 + K_{n2}U_2 + K_{n3}U_3), \end{aligned} \quad (6.5)$$

де $K_{n1} = R_0/R_1$ – коефіцієнт передачі підсилювача на першому вході;

$K_{n2} = R_0/R_2$ – те ж, на другому вході;

$K_{n3} = R_0/R_3$ – те ж, на третьому вході.

Для підсилювача, що підсумовує, приймають $R_0 = R_1 = R_2 = R_3$. Тоді з виразу (6.5) одержуємо $U_{vix} = -(U_1 + U_2 + U_3)$, тобто вихідна напруга дорівнює алгебраїчній сумі вхідних напруг, узятих із зворотним знаком.

Якщо операційний підсилювач має один вхід і $R_0 = R$, то $U_{vix} = -U_1$, тобто підсилювач тільки змінює знак вхідної напруги. Такий підсилювач називають *інвертором*.

Диференціальний операційний підсилювач. Для виконання операції диференціювання операційний підсилювач включають за схемою, поданою на мал. 6.3. Струм, що проходить через резистор R , визначається з виразу

$$I = \frac{U_{vix} - U_{vx1}}{R} = C \frac{d}{dt} (U_{vx1} - U_{vx})$$

Беручи до уваги, що напруга U_{vx1} значно менша напруг U_{vx} і U_{vix} ,

можна записати

$$U_{вых} \approx -RC \frac{dU_{вх}}{dt} \quad (6.6)$$

З отриманого виразу (6.6) випливає, що вихідна величина підсилювача пропорційна похідній від вхідної величини.

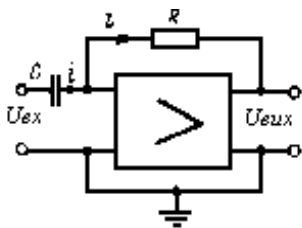


Рис. 6.3. Схема диференційовального операційного підсилювача

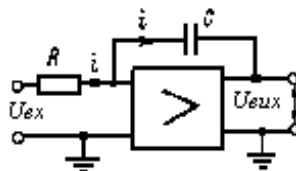


Рис. 6.4. Схема інтегрувального операційного підсилювача

Інтегрувальний операційний підсилювач. Операція інтегрування виконується за схемою вмикання операційного підсилювача (рис. 6.4). На підставі першої і другої властивостей операційних підсилювачів можемо записати $U_{вых} = -U_c$ і $U_{вх} = UR$. Тоді струм I можна визначити з виразу $I = U_R/R = U_{вх}/R$.

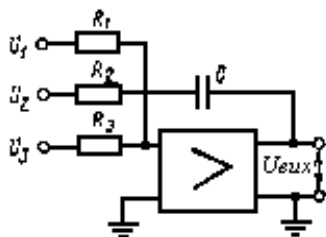


Рис. 6.5. Схема суматорного інтегратора (операційного підсилювача)

Цей же струм заряджає конденсатор, тому що вхідний струм підсилювача дорівнює нулю. Напряга на конденсаторі, а отже, і на виході схеми

$$U_{вых} = -\frac{1}{C} \int_0^t i dt = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_{вх} dt = -Kn \int_0^t U_{вх} dt \quad (6.7)$$

де $Kn = 1/(RC)$ – коефіцієнт передачі інтегрувального підсилювача.

З виразу (6.7) видно, що такий підсилювач інтегрує вхідну напругу.

За наявності декількох входів (мал. 6.5) схема інтегрує алгебраїчну суму вхідних напруг $U_{вх} = U_1 + U_2 + U_3$, кожна з яких збільшується на відповідний коефіцієнт передачі, тобто

$$U_{вх} = U_1 + U_2 + U_3$$

$$U_{вих} = - \int_0^t \left(\frac{U_1}{RC} + \frac{U_2}{R_2C} + \frac{U_3}{R_3C} \right) dt.$$

Величина $\tau = RC$ визначає постійну часу інтегрувального підсилювача.

Пристрої множення і ділення

Для дії множення використовується схема (рис. 6.6), що виконує відому залежність

$$U_x U_y = \left(\frac{U_x + U_y}{2} \right)^2 - \left(\frac{U_x - U_y}{2} \right)^2$$

У цьому виразі операція множення замінюється операціями додавання, віднімання і піднесення до квадрата.

Для реалізації дії додавання використовуються суматорні операційні підсилювачі, а для піднесення до квадрата - застосовуються функціональні перетворювачі, що відтворюють квадратичну залежність (параболу). Коефіцієнти передачі за кожним входом для підсилювачів Σ_1 і Σ_2 беруть 1/2, а для Σ_3 беруть 1. На виході підсилювача Σ_1 утворюється напівсумма $(U_x + U_y)/2$, що підноситься до квадрата першим перетворювачем KB_1 . Перший інверторний підсилювач (III_1) змінює знак напруги U_y , тому на виході другого підсилювача Σ_2 утвориться напіврізниця $(U_x - U_y)/2$, що підноситься до квадрата другим перетворювачем KB_2 .

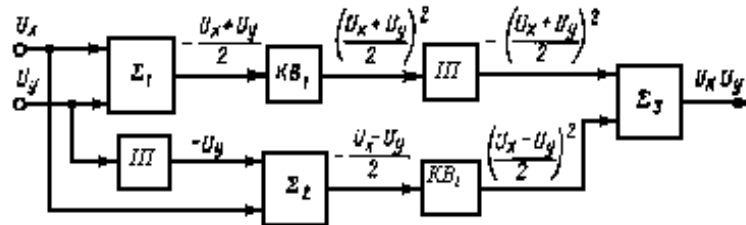


Рис. 6.6. Структурна схема пристрою множення

результат, Другий інверторний підсилювач III_2 змінює знак квадрата напівсуми.

На виході третього підсилювача Σ_3 утворюється остаточний що дорівнює добутку вхідних напруг, тобто $U_x U_y$.

Операцію ділення в аналоговій обчислювальній машині здійснюють множенням одної змінної на зворотну величину другої або використовують принцип зворотного зв'язку. У першому випадку функцію $1/U_y$, що відображає гіперболу, одержують за допомогою функціонального перетворювача Φ (структурна схема операції на рис. 6.7).

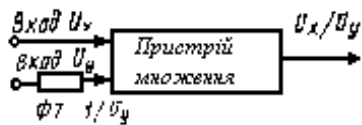


Рис. 6.7. Схема ділення з використанням функціонального перетворювача

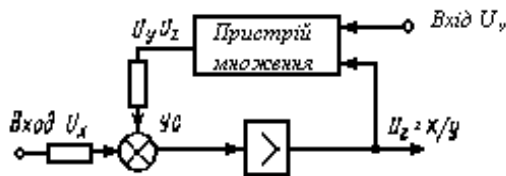


Рис. 6.8. Схема ділення з використанням зворотного зв'язку

При введенні зворотного зв'язку (рис. 6.8) схема також має два входи U_x та U_y і величину зворотного зв'язку U_z , що дорівнює приблизно шуканій частці.

На вхід пристрою множення подається U_z і U_y , а отриманий на виході добуток $U_y U_z$ дорівнює в пристрої порівняння (III) із співмножникові U_x . Різниця цих величин $\Delta = U_x - U_y U_z$ підсилюється операційним підсилювачем і при досить великому коефіцієнті підсилення близька до нуля. Тому при $\Delta = 0$, $U_x = U_y U_z$ і $U_z = U_x / U_y$, тобто дана схема також виконує операцію ділення.

Контрольні питання

1. Призначення, характеристики та властивості операційних підсилювачів?
2. Принципова схема підсумовуючого підсилювача та принцип підсумовування?
3. Принципова схема диференціюючого підсилювача та принцип диференціювання?
4. Принципова схема інтегруючого підсилювача та принцип інтегрування?
5. Структурна схема пристрою множення з використанням функціональних перетворювачів?
6. Структурна схема пристрою ділення з використанням функціонального перетворювача?

ЛЕКЦІЯ 7. Цифроаналогові та аналого-цифрові перетворювачі

Цифроаналогові перетворювачі

Цифроаналоговий перетворювач (ЦАП) призначений для перетворення цифрового сигналу в аналоговий. Іноді його називають перетворювачем код-аналог.

Миттєва напруга на виході ЦАП пропорційна до “ваги” коду, що присутній на входах, тобто його десятковому еквіваленту.



Рис. 7.1. Залежність вихідної напруги ЦАП від цифрового сигналу на вході

Рис. 7.2. Схема інвертованого суматора

Змінні коди на вході ЦАП обумовлюють змінну напругу на його виході.

Напруга на виході ЦАП є сумою напруг, кожна з яких обумовлена одиницею у відповідному розряді вхідного коду. Розміри цих складових відносяться як ваги одиниць у розрядах: якщо від одиниці в першому розряді з’являється на виході напруга U_1 , то від одиниці в другому розряді – $2U_1$ від одиниці в третьому розряді – $4U_1$ і т.д. Так, приміром, якщо на вході є присутнім код 1011001, то напруга на виході ЦАП дорівнює $1 (64 U_1) + 0 (32 U_1) + 1 (16 U_1) + 1 (8 U_1) + 0 (4 U_1) + 0 (2 U_1) + 1 U_1 = 89U_1$.

На мал. 7.1 зображено залежність вихідної напруги ЦАП від цифрового сигналу на вході.

ЦАП із двійково зваженими резисторами

Зазначене перетворення можна здійснити, якщо використовувати двійково зважені резистори ($R_i, 2R_i, 2^2R_i \dots 2^{n-1}R_i$). Опори їх відносяться як ваги одиниць у розрядах двійкового коду.

На рис. 7.2 зображено схему інвертованого суматора з такими резисторами. На підхожих до резисторів шинах є електричні потенціали, що відповідають цифрам у розрядах коду; причому цифрі 0 відповідає $0 V$, а цифрі 1 - потенціал U^1 .

До резистора R підходить шина старшого розряду, а до резистора $2^{n-1}R$ – шина молодшого розряду. За наявності 1 у старшому ($n-1$) розряді коду струм через резистор R (точка a – “земля, що здається”) дорівнює U^1/R , за наявності 1 у слідуєчому ($n-2$) розряді струм через резистор $2R$ дорівнює $U^1/2R$ і т. д., при наявності 1 у молодшому (нульовому) розряді коду струм через резистор $2^{n-1}R$ дорівнює $U^1/2^{n-1}R$.

Струми, обумовлені одиницями в розрядах коду, підсумовуються на резисторі R_0 і створюють напругу, що в загальному випадку дорівнює:

$$U_{вих} = \frac{U^1 R_0}{R} \left(a_{n-1} \frac{1}{2} + a_{n-2} \frac{1}{2^2} + a_{n-3} \frac{1}{2^3} + \dots + a_0 \frac{1}{2^{n-1}} \right)$$

де n – число розрядів коду;

a_{n-1}, \dots, a_0 – цифри (1 або 0) у розрядах коду.

Цей вираз можна подати інакше:

$$U^1 R_0$$

$$U_{вих} = \frac{1}{R} 2^{-(n-1)} (a_{n-1} 2^{n-1} + a_{n-2} 2^{n-2} + \dots + a_1 2^1 + a_0)$$

Легко зауважити, що записана в дужках сума – двійковий код числа. Таким чином, напруга на виході ЦАП (рис. 7.2) пропорційна до ваги діючого на вході коду.

Недоліками наведеної схеми є необхідність ретельного відбору резисторів різних номіналів, із тим щоб їхні опори знаходилися в належній відповідності, а також неможливість практично витримати цю відповідність у діапазоні температур.

ЦАП із резистивною матрицею $R - 2R$

Зазначених недоліків багато в чому позбавлена схема (рис. 7.3), у якій використовується резистивна матриця $R - 2R$, що містить резистори тільки двох номіналів. Тригери регістра встановлюються в положення 1 або 0 відповідно до вхідного коду. Якщо в розряді регістру записано 1 ($Q = 1$), то через відімкнутий ключ $K_{л1}$ до резистора $2R$ матриці підводиться напруга U_1 ; якщо в цьому розряді записано 0 ($Q = 0$), то відімкнутим виявляється ключ $K_{л0}$, через котрий резистор $2R$ з'єднується із “землею”.

Нехай у якомусь розряді регістра записано 1, а в інших розрядах 0: до одного з резисторів $2R$ (наприклад, $R_{в}$, - рис. 7.4) підведено напругу U_1 , а ліві за схемою виводи інших резисторів $2R$ з'єднано із “землею”. При цьому опір, включений між вузлом B і “землею” (3), $R_{вз} = R$ (що просто визначити, починаючи розрахунок із верхніх за схемою резисторів), а опір між вузлом B і “землею”, складений резисторами вище вузла B , $R'_{вз} = 2R$. Аналогічно, опір між вузлом Γ і “землею” $R_{гз} = R$, а опір між вузлом B і “землею”, складений резисторами нижче вузла B , $R''_{вз} = 2R$. Звідси повний опір між вузлом B і “землею”, $R_{вз} = R$, а напруга між цими точками

$$U_{в} = \frac{U_1}{R_{в} + R_{вз}} \quad R_{гз} = \frac{U_1}{2R + R} \quad R = \frac{1}{3} U_1.$$

Легко визначити, що така ж напруга буде між будь-яким вузлом і “землею”, якщо напруга U_1 , підводиться до резистора $2R$, приєднаного до цього вузла, а ліві за схемою виводи інших резисторів $2R$ з'єднані з “землею”.

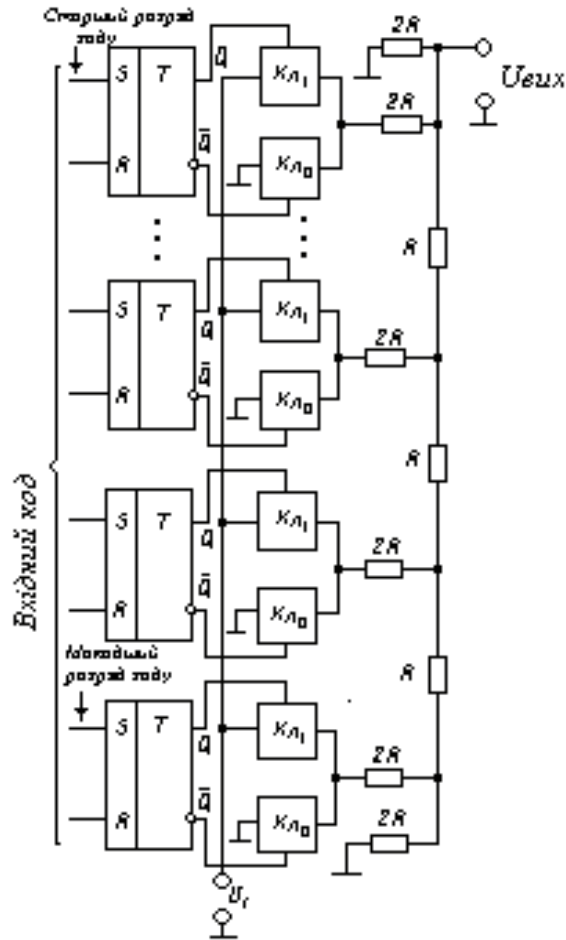


Рис.7.3. Схема ЦАП з резистивною матрицею $R - 2R$

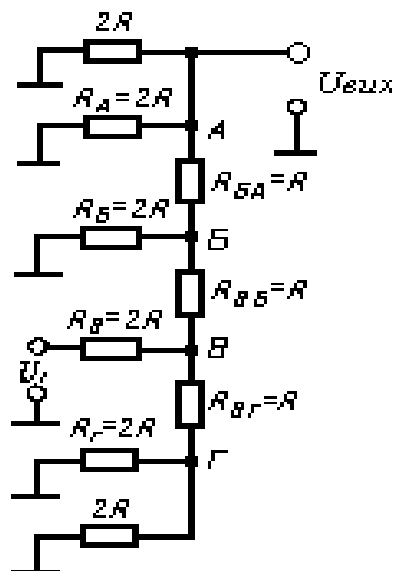


Рис.7.4. Схема резистивної матриці $R - 2R$

У розглянутому випадку (рис. 7.4) у вузлах матриці – за рахунок

напруги у вузлі B – будуть наступні напруги щодо “землі” (верхній індекс відповідає вузлу, до якого через резистор $2R$ підводиться напруга U_1).

$$U_B = \frac{U_{B3} R_{B3}}{R_{BB} + R_{B3}} = \frac{1}{3} U_1 \frac{R}{2R} = \frac{1}{6} U_1,$$

$$U_A = \frac{U_{BA} R_{BA}}{R_{BA} + R_{A3}} = \frac{1}{4} U_1 \frac{1}{3} = \frac{1}{12} U_1.$$

З наведених виразів випливає, що при переході від вузла B до вузлів, розташованих ближче до вихідних затискачів, напруга

$$U_B = \frac{1}{3} U_1 \text{ щоразу зменшується вдвічі.}$$

Аналогічно ділиться напруга – $\frac{1}{3} U_1$, що спочатку з’являється в інших

вузлах матриці. Це означає, що напруга на виході матриці при одному замкнутому ключі K_{l1} (рис. 7.3) буде залежати від того, який вузол через резистор $2R$ підключений до напруги U_1 . Так

$$U_{вих} = \frac{1}{3} U_1, \quad U_{вих} = \frac{1}{2} U_1, \quad U_{вих} = \frac{1}{4} U_1,$$

$$U_{вих} = \frac{1}{8} U_1.$$

Вихідна напруга, обумовлена наявністю одиниць у декількох розрядах вхідного коду, визначається за принципом накладення від кожної одиниці у відповідному розряді. Таким чином, резисторна матриця $R - 2R$ забезпечує вихідну напругу, пропорційну до ваги коду на вході ЦАП.

Аналого-цифрові перетворювачі

Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) перетворює аналоговий сигнал у цифровий.

АЦП часового перетворення. Принцип перетворення такого типу полягає в тому, що вхідній напрузі $U_{вх}$ ставиться у відповідність часовий інтервал, тривалість якого пропорційна $U_{вх}$. Цей інтервал заповнюється імпульсами стабільної частоти. Кількість їх i дає цифровий еквівалент напруги, що перетворюється.

Схему, що реалізує зазначений принцип, зображено на рис. 7.5. Імпульс із виходу генератора тактових імпульсів (ГТІ) обнуляє лічильник, запускає генератор лінійно змінної напруги (ГЛЗН) і переключає тригер у стан $Q = 1$. Сигналом $Q = 1$ генератор рахункових імпульсів (ГРІ) через кон'юнктор підключається до лічильника. Коли наростаюча напруга ГЛЗН дорівнюватиме напрузі, що перетворюється U_{ex} , на виході компаратора з'явиться логічна 1, що переключить тригер у стан $Q = 0$ і перерве зв'язок ГРІ з лічильником. Код, що встановлюється на виході лічильника, – цифровий еквівалент аналогової величини (вхідної напруги). Зі зміною U_{ex} змінюється і код на виході лічильника.

Часові діаграми на рис. 7.6 ілюструють описані процеси. На виході тригера формуються “часові ворота”. Початок їх відповідає тактовому імпульсу, а кінець – появи 1 на виході компаратора, коли настає рівність $U_{ГЛЗН} = U_{ex}$. Таким чином, тривалість “часових воріт” пропорційна значенню вхідної напруги. “Часові ворота” заповнюються рахунковими імпульсами стабільної частоти, тому їхнє число пропорційно значенню U_{ex} .

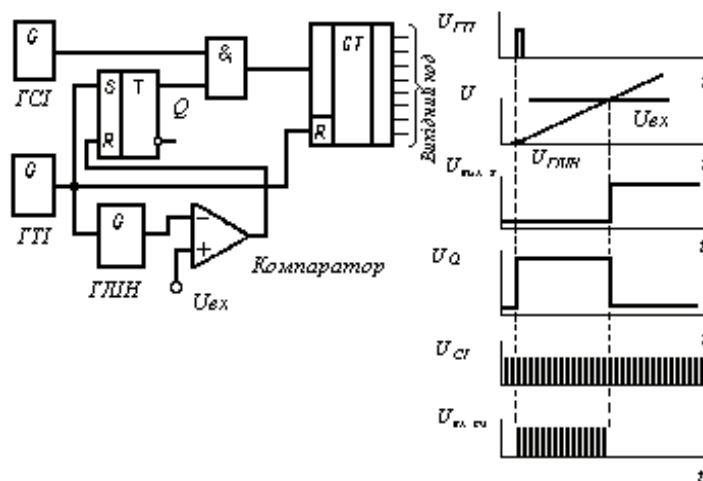


Рис. 7.5. АЦП часового перетворення

Рис.7.6. Часові діаграми

АЦП, що врівноважує

Робота перетворювача зводиться до такого. Рахункові імпульси заповнюють лічильник, на виході якого формується код із наростаючою вагою. Цей код надходить на ЦАП, напруга на виході якого збільшується. Коли вона зрівняється з вхідною напругою, доступ імпульсів до лічильника припиняється. Код, що встановлюється при цьому на лічильнику, є цифровим еквівалентом напруги на виході ЦАП, а отже, і напруги U_{ex} .

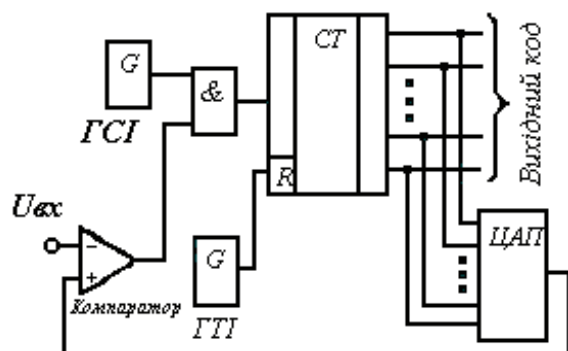


Рис. 7.7. АЦП, що врівноважує

Схему, що реалізує описаний принцип, зображено на мал. 7.7. Перетворення починається з обнуління лічильника імпульсом генератора тактових імпульсів (ГТІ). Після цього на вході ЦАП дорівнює нулю – на виході компаратора логічна 1, що забезпечує надходження рахункових імпульсів від генератора рахункових імпульсів (ГРІ) через кон'юнктор на лічильник. Коли напруга на виході ЦАП стане практично дорівнювати $U_{вх}$, компаратор перемкне і логічним 0 на виході роз'єднає ГРІ та лічильник.

Контрольні питання

1. Призначення та сфера застосування цифро-аналогових перетворювачів.
2. Принцип перетворення цифрового коду в аналогову величину за допомогою двійковозважених резисторів.
3. Принцип перетворення коду за допомогою резистивної матриці R-2R.
4. Призначення та сфера застосування аналого-цифрових перетворювачів.
5. Принцип часового перетворення аналогового сигналу у цифрову величину.
6. Принцип врівноважування аналогового сигналу при перетворенні його у цифровий.

ЛЕКЦІЯ 8. Електромагнітні елементи систем автоматики

Серед великого різноманіття електромагнітних елементів автоматики важливе місце займають електромагнітні реле, магнітні підсилювачі та магнітокеровані контакти.

Реле. Загальні відомості

Реле є простим автоматичним пристроєм, що приводить у дію одне або декілька керованих електричних кіл при досягненні параметрами керовального кола певних значень.

Функції, що виконуються реле, і їхні конструкції надзвичайно різноманітні. Характерні ознаки реле дозволяють класифікувати їх за такими чинниками:

- за принципом дії (електромагнітні, магнітоелектричні, електронні);
- за способом приєднання (контактні, безконтактні);
- за призначенням (керування, захисту, блокування);
- за характером вхідної величини (електричні, оптичні, механічні, акустичні).

Основні характеристики реле визначаються залежностями між параметрами вихідної і вхідної величини. Розрізняють такі основні характеристики реле.

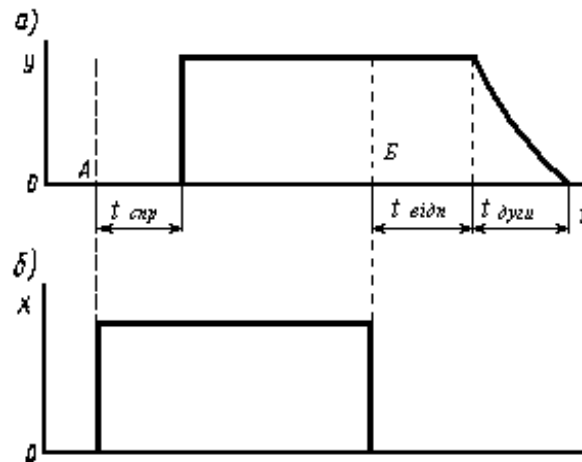


Рис. 8.1. Графік роботи реле

Величина спрацьовування $X_{\text{спр}}$ – значення параметра вхідної величини, при якій реле вмикається. При $X < X_{\text{спр}}$ параметр вихідної величини $Y = 0$. При $X \geq X_{\text{спр}}$ величина Y стрибком змінюється від Y_{\min} до Y_{\max} і реле вмикається.

Величина відпускання $X_{\text{відп}}$ – значення параметра вхідної величини, при якому відбулося стрибкоподібне зменшення вихідного параметра з Y_{\max} до Y_{\min} і реле відімкнулося.

Величина параметра, на яку відрегульовано реле, називається *уставкою*.

Коефіцієнт повернення K_v – відношення величини відпускання до

величини спрацьовування

$$K_{нов} = X_{відп} / X_{спр}$$

Час спрацьовування $t_{спр}$ – проміжок часу від моменту появи імпульсу (вхідної величини) до моменту стрибкоподібної зміни вихідної величини.

Час відпускання $t_{відп}$ – проміжок часу від моменту зняття сигналу (вхідної величини) до моменту досягнення $U_{мін}$. Цей час перебуває з двох частин: часу відпускання і часу гасіння дуги. Уявлення про час роботи реле дає графік на рис. 8.1. На рис. 8.1 *а* дана залежність струму від часу в керованому ланцюзі, а на рис. 8.1 *б* – в керуючому ланцюзі (в обмотке реле). Точка *А* – початок імпульсу на спрацьовування, а точка *Б* – початок відпускання.

Крім функції комутації реле виконує також функцію посилення, обумовлену відношенням:

$$K_k = P_k / P_{спр}$$

де P_k – максимальна потужність у навантаженні керованого ланцюга;

$P_{спр}$ – мінімальна потужність вхідного сигналу, при якому відбувається спрацьовування реле.

Для реле з виконавчим органом у вигляді контактної системи максимальна потужність керування P_k визначається не тривалістю струму, що може пропустити контакт, а струмом, що може бути багаторазово відімкнений.

Електромагнітні реле

Електромагнітні реле – це електричний апарат, у якому при зміні вхідної (керувальної) величини X відбувається стрибкоподібна зміна вихідної (керуваної) величини Y . З двох величин хоча б одна повинна бути електричною.

Електромагнітні реле завдяки простому принципу дії і надійності здобули широке застосування в системах автоматики, а також у схемах захисту енергосистем.

Електромагнітним називають реле, у якого контакти переміщуються при притягуванні якоря до осердя електромагніту, в обмотці якого протікає струм.

Основні параметри електромагнітних реле:

струм спрацьовування $I_{спр}$ – це таке значення струму в котушці реле, при якому воно спрацьовує, тобто його контакти переходять із попереднього в інший стан (замикаються або розмикаються);

робочий струм I_r – це таке значення струму в котушці реле, при якому забезпечується задане натискання контактів, тобто мінімальний перехідний опір між контактами;

струм відпускання $I_{відп}$ – це таке значення струму в котушці реле, при якому магнітний потік недостатній для утримання якоря і контакти повертаються у попередній стан.

Реле постійного струму є найбільш поширеним видом електромагнітних

реле. Це пояснюється порівняно простою конструкцією реле і значним коефіцієнтом підсилення K_k . На практиці найчастіше застосовуються електромагнітні реле з поворотним і втяжним якорем.

Реле з поворотним якорем показано на рис. 8.2 а. Під дією напруги U у котушці 1 виникає струм I , що створює магнітний потік, який замикається через осердя 2, магнітопровід 3 і яркір 4. Потік намагнічує яркір, виникає електромагнітна сила, під дією якої яркір притягується до осердя, повертаючись при цьому навколо центру O . Під дією якоря контакт 6 переміщується вліво. У результаті контакти 5 і 6 розімкнуться, а контакти 6 і 7 зімкнуться. Ланцюг з лампою $L2$ буде вимкнено, а з лампою $L1$ увімкнено.

Після зняття напруги U струм у котушці зникне, відповідно зникне електромагнітна сила, і яркір під дією сили поворотної пружини 6 (поворотною пружиною може бути самий контакт 6) відхилиться в зворотному напрямку. При цьому контакти 6, 7 розімкнуться, контакти 5, 6 зімкнуться, $L1$ погасне і $L2$ засвітиться.

Контакти 5, 6, 7 укріплено на підставці 9 з діелектрика. Завдяки штифту 8, яркір не буде впритул прилягати до осердя (між ними завжди буде зазор), тому не виникне ефект “залипання” (проходження залишкового магнітного потоку по магнітопроводу якоря і осердя після зникнення струму) і для відриву якоря від осердя буде потрібна менша сила пружини, ніж за відсутності штифта.

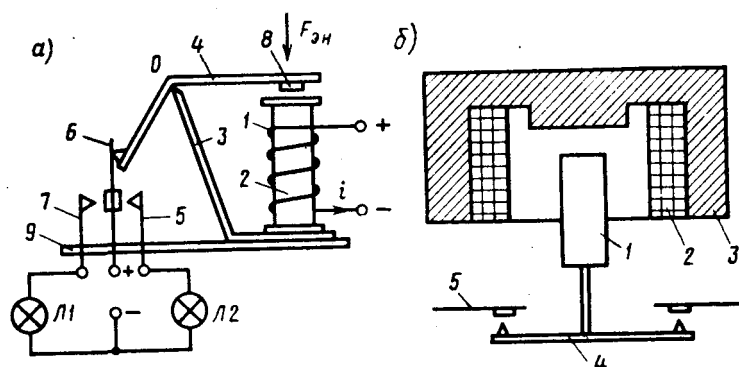


Рис. 8.2. Електромагнітні реле постійного струму

Реле з втяжним якорем (рис. 8.2 б) спрацьовує також за наявності струму в котушці 2 і створенні при цьому електромагнітної сили. Яркір 1 втягується в середину котушки і притягується до осердя 3. Одночасно з якорем переміщується контактна перемичка 4, що замикає контакти 5. При відімкненні струму яркір під дією пружини повертається у попереднє положення. Як впливає з опису принципу дії, електромагнітне реле конструктивно складається з магнітопроводу (включаючи яркір), котушки і контактної групи.

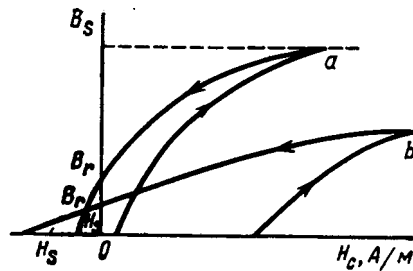


Рис. 8.3. Характеристики магнітних матеріалів

Магнітопровід виготовляється з різних матеріалів із заданими магнітними характеристиками. Розрізняють основні види магнітних матеріалів: магнітом'які і магнітотверді (рис. 8.3).

Магнітом'які (рис. 8.3 *a*) характеризуються низькою коерцитивною силою H_c (напруженість магнітного поля, яка необхідна для зниження залишкової індукції до 0) і високим значенням магнітної проникності μ . Магнітотверді (рис. 8.3 *b*) мають високі значення коерцитивної сили H_c : і низькі значення магнітної проникливості μ .

При виборі матеріалу для магнітної системи враховують вимоги до реле, що визначаються його призначенням і вартістю. Розрізняють два основних види магнітопроводу: суцільний і шихтований. Як правило, реле постійного струму мають магнітопровід із суцільного матеріалу, а реле змінного струму - із шихтованого.

Котушка реле є одним з основних елементів електричного апарата. Вона повинна задовольняти такі вимоги: мати мінімальні габаритні розміри, бути технологічною у виробництві, не перегріватися при максимально допустимій напрузі живлення, мати механічну міцність і стійкість до іспитової напруги для перевірки діелектричної міцності ізоляції.

Нагрівання котушки визначається втратою потужності при протіканні струму I тобто $P=I^2R$. Гранично допустима температура нагрівання котушки обмежується теплостійкістю ізоляції.

Контактною групою називається елемент реле, що здійснює операції замикання або розмикання ланцюга, у якій включено контакти.

Контакти виготовляються з різних матеріалів, що вибираються залежно від прийнятого тиску в контактах, умов роботи за частотою, розривної потужності і ресурсу роботи. Руйнування контактів визначається механічним зносом (утворюється внаслідок ударів рухливого контакту об нерухомий), хімічним зносом – корозією (утворюється внаслідок окиснювання матеріалу при високих температурах) та електричним зносом – ерозією (виражається в перенесенні металу з одного контакту на інший і порушенні при цьому контактної поверхні).

Найбільш поширені форми контактів наведено на рис. 8.4.

При замиканні і розмиканні контактів електричного ланцюга з ЕРС відбувається іскріння між контактами.

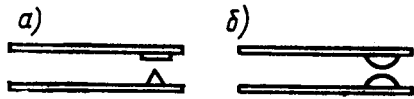


Рис. 8.4. Форми контактних пар:
 а – плеската пара;
 б – півкуля – півкуля

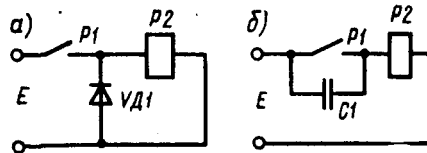


Рис. 8.5. Схеми іскрогасіння з діодом (а) і з конденсатором (б)

Найсильніше іскріння утворюється при розмиканні ланцюга з індуктивним навантаженням. Таким навантаженням може бути обмотка контактора, електромагніта, електродвигуна і т. ін. Іскріння призводить до обгорання й оплавлення контактів, крім того, при іскрінні виникають перешкоди, що можуть порушувати роботу електронної та радіоапаратури, яка знаходиться поблизу. Таким чином, іскріння шкідливе і його намагаються зменшити, застосовуючи різні схеми іскрогасіння. На рис. 8.5 наведено схеми з напівпровідниковим діодом $VD1$ (рис. 8.5 а), увімкнутим паралельно індуктивному навантаженню і конденсатором $C1$ – паралельно контактам (рис. 8.5 б). При розмиканні контактів $P1$ у котушці реле $P2$ виникає ЕРС самоіндукції. Струм, викликаний цією ЕРС, замикається через діод $VD1$ і котушку $P2$ (у схемі з діодом) і через джерело живлення E , конденсатор $C1$ і котушку $P2$, минаючи контакти $P1$. За рахунок цього іскріння контактів $P1$ зменшується. Слід зазначити, що в схемі з діодом змінювати полярність живильної напруги E не можна, тому що у випадку заміни при замиканні контактів $P1$ джерело E буде замкнено на діод у прямому напрямку, тобто виникне коротке замикання.

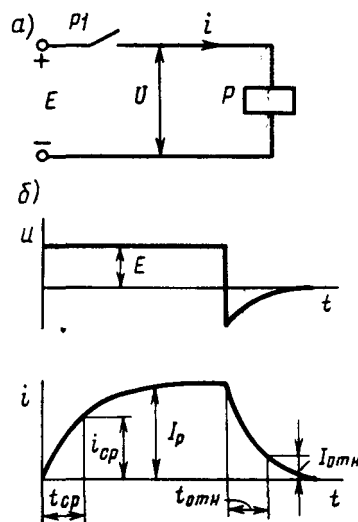


Рис. 8.6. Схема вмикання (а) і тимчасові діаграми (б) роботи реле

При вмиканні і вимиканні електромагнітного реле виникають перехідні процеси, що впливають на час спрацьовування t_{cnp} і час відпускання $t_{відп}$. При замиканні контакту $P1$ (рис. 8.6) напруга U на котушці реле P збільшується стрибком від 0 до E . З цього моменту струм у котушці

починає зростати за експоненціальним законом:

$$i = I_p (1 - e^{-t/\tau}), \quad (8.1)$$

де $I_p = E/R$ – робочий струм; R - активний опір ланцюга котушки;

$\tau = L_1/R$ – постійна часу ланцюга котушки реле; L_1 – індуктивність котушки.

При розмиканні контактів PI напруга U стрибком τ зменшується. З цього моменту струм у котушці починає зменшуватися за експонентою:

$$i = I_p e^{-t/\tau_2}, \quad (8.2)$$

де $\tau_2 = L_2/(R+Q)$ – постійна часу ланцюга котушки, якщо якір притягнут; Q – опір між контактами PI при іскрінні.

Підставивши у формулу (8.1) $i = I_{cnp}$ і $t = t_{cnp}$, а у формулу (8.2) $i = I_{відп}$ і $t = t_{відп}$, можна відповідно отримати

$$t_{cnp} = \tau_1 \ln I_p / (I_p - I_{cnp}); \quad (8.3) \quad t_{відп} = \tau_2 \ln I_p / I_{відп} \quad (8.4)$$

З формул (8.3) і (8.4) випливає, що t_{cnp} і $t_{відп}$, тобто швидкодія реле, залежать від постійної часу ланцюга котушки і струмових параметрів реле.

Електромагнітні реле змінного струму за принципом дії не відрізняються від реле постійного струму, однак мають особливості конструкції, обумовлені тим, що струм у котушці двічі за період набирає нульового значення і тим самим викликає вібрацію якоря та контактів. Для зменшення вібрації один полюс осердя 1 (рис. 8.7) роздвоюють і на одну половину поміщають мідну пластину 2 (короткозамкнутий виток).

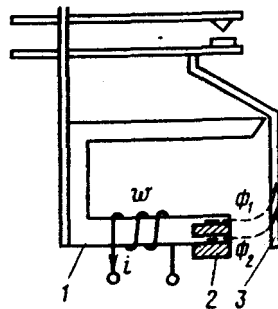


Рис. 8.6. Електромагнітне реле змінного струму

Струм i створює магнітний потік, що ділиться в полюсі осердя на два потоки Φ_1 і Φ_2 . Потік Φ_2 наводить у короткозамкнутому витку струм, що перешкоджає змінам потоку Φ_2 (за законом електромагнітної індукції). У результаті потік Φ_2 відстає по фазі від потоку Φ_1 . Тоді при $\Phi_1 = 0$ $\Phi_2 \neq 0$ і навпаки, тому електромагнітна сила міцно утримує якір біля осердя. Осердя і якір 3 виконуються шихтованими з листової трансформаторної сталі з метою зменшення втрат на гістерезис і вихрові струми.

Поляризовані реле

Поляризованим називають електромагнітне реле, у якого напрямок переміщення якоря залежить від напрямку струму в котушці реле, тобто від полярності вхідної напруги, що досягається взаємодією двох магнітних

потоків: робочого, утвореного котушкою, і поляризованого, створюваного постійним магнітом. Завдяки цьому поляризовані реле мають значно більшу чутливість ніж електромагнітні. Головним недоліком поляризованих реле є мале число контактних груп.

На рис. 8.8 а показано поляризовану систему, що набула широкого застосування завдяки своїй чутливості і швидкодії. Розподіл магнітних потоків, утворених постійним магнітом M та електромагнітом (котушкою) w , подане на рис. 8.8 б.

Потоки постійного магніту в зазорах δ_1 і δ_2 рівні:

$$\Phi_{M1} = \Theta_M / (R_{\delta 1} + R_{\delta 2}); \quad \Phi_{M2} = \Theta_M / (R_{\delta 2} + R_{\delta}), \quad (8.5)$$

де Θ_M - магніторушійна сила (МРС) постійного магніту;

$R_{\delta 1}$ і $R_{\delta 2}$ - магнітні опори зазорів δ_1 і δ_2 ; R_{δ} - магнітний опір паразитного зазору δ .

Потік від керувальної котушки:

$$\Phi_K = \Theta_K / (R_{\delta 1} + R_{\delta 2}),$$

де Θ_K - МРС котушки.

Результуюча сила, що діє на кінець якоря, дорівнює різниці сил, створених у зазорах δ_1 і δ_2 . Відповідно до формули Максвелла для визначення сили в зазорі можемо записати результуюче значення сили, що діє на якір:

$$F_{я.рез} = F_{\delta 1} - F_{\delta 2} = \frac{1}{2\mu_0 S n} [(\Phi_{M1} - \Phi_K)^2 - (\Phi_{M2} + \Phi_K)^2], \quad (8.6)$$

де $S n$ - площа полюса робочого зазора; Φ_{M1} і Φ_{M2} - магнітні потоки в плечах.

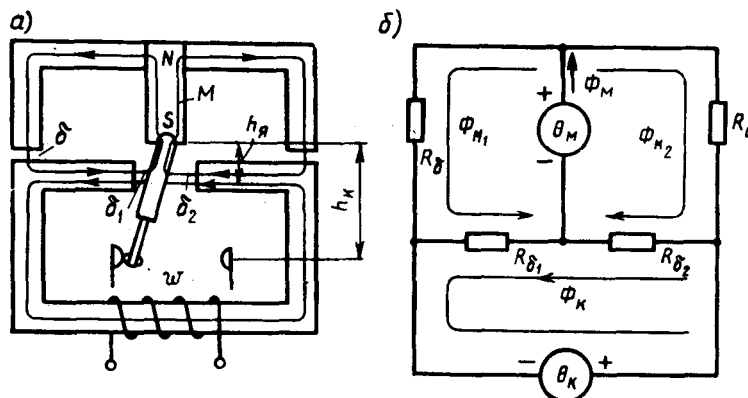


Рис. 8.7. Поляризоване реле і його схема заміщення

Спрацьовування реле відбудеться тоді, коли сила $F_{я.рез}$ змінить свій напрямок, тобто буде дотримана нерівність

$$F_{я.рез} \leq 0. \quad (8.7)$$

Для визначення потоку спрацьовування $\Phi_{к.спр}$ скористаємося рівняннями (8.6) і (8.7) і одержимо:

$$(\Phi_{M1} + \Phi_{M2})(\Phi_{M1} - \Phi_{M2} - 2\Phi_{к.спр}) = 0$$

$$\text{Оскільки } \Phi_{M1} + \Phi_{M2} \neq 0, \text{ то } \Phi_{к.спр} = (\Phi_{M1} + \Phi_{M2})/2 \quad (8.8)$$

Тоді із рівняння (8.6) і (8.7) получим

$$\Theta_{к.спр} = 0,5 \Theta_M (\delta_2^2 - \delta_1^2) / (\delta + \delta_1)(\delta_1 + \delta_2). \quad (8.9)$$

Якщо δ_1 наблизити до δ_2 , то можна одержати дуже малу магніторушійну силу спрацювання. Завдяки цьому потужність спрацювання чутливих поляризованих реле становить усього 10^{-6} Вт. Слід зазначити, що сила натискання рухливого контакту на нерухомий визначається різницею зазорів δ_1 і δ_2 . З геометрії системи реле (рис. 8.7, а) впливає:

$$F_k = F_{я} \frac{h_{я1}}{h_{к2}} = \mu_0 S_n (\Phi_M^2 - \Phi_{M2}^2) \frac{h_{я1}}{h_{к2}},$$

де $h_{я1}$ і $h_{к2}$ – відстань між магнітними потоками постійного магніту й електромагніту і між постійним магнітом і контактом відповідно.

Чим ближче зазор δ_1 до зазора δ_2 , тим менша сила, що діє на контакти.

Контрольні питання

1. Визначення електромагнітного реле та його основні параметри?
2. Основні конструктивні елементи електромагнітного реле та їх призначення?
3. Принцип дії електромагнітних реле на змінному струмі?
4. Визначення та особливості конструкції поляризованого реле?
5. Принцип дії поляризованих реле?
6. Переваги та недоліки електромагнітних реле різних типів?

ЛЕКЦІЯ 9. Електричні машини систем автоматики

Мікродвигуни

Виконавчими (керованими) двигунами (ВД) автоматичних систем називають двигуни, призначені для перетворення електричного сигналу на кут повороту або частоту обертання вала. У даний час найбільше поширення дістали асинхронні двофазні ВД, ВД постійного струму з незалежним збудженням або зі збудженням від постійних магнітів та крокові двигуни.

Вимоги до ВД впливають із специфічних умов роботи ВД у пристроях автоматики. Основні з них:

- висока швидкодія (мала інерційність);
- можливість регулювання частоти обертання ВД у широкому діапазоні;
- відсутність самовільного обертання (самоходу) за відсутності керувального сигналу;
- висока лінійність регулювальних і механічних характеристик;

малий момент тертя (мала напруга зрушення).

Важливі для ВД і такі параметри, як пусковий момент, габарити, маса, потужність керування. ККД і $\cos \varphi$ мають другорядне значення. Коли потрібна строго постійна частота обертання, використовуються синхронні двигуни.

Асинхронні виконавчі двигуни

Асинхронні виконавчі двигуни – найпоширеніші ВД змінного струму. На статорі в них розташовані дві розподілені обмотки, просторово зміщені на електричний кут 90° : обмотка збудження f і обмотка керування y . Обмотка збудження постійно підключена до мережі змінного струму, на обмотку керування подається керувальний сигнал (рис. 9.1 а). Для створення в робочому зазорі ВД обертового магнітного поля необхідний зсув у часі фаз струмів обмоток f і y . Максимум потужності, що розвивається ВД, відповідає рівності МРС $F_y = F_f$ і зсуву струмів I_f і I_y на 90° . Зсув струмів (напрэг) може здійснюватися за допомогою пристроїв, що фазозсують (ФЗП), фазообертачів (ФО), конденсаторів.

Керування асинхронними ВД виконується декількома способами. Найчастіше це амплітудний, фазовий і амплітудно-фазовий способи. Крім того, обмежене застосування має частотне регулювання (мал. 9.1 б), імпульсне регулювання й ін.

При амплітудному способі керування (мал. 9.1 а) обмотка збудження підключена до мережі $U_f = U_c$, а на обмотку керування подається керувальна напруга U_y . Фазовий зсув напруг U_f і U_y постійний ($\gamma = 90^\circ$). Напругу керування, при якій обертове поле в зазорі ВД кругове, беруть за номінальну $U_{y.ном}$. Якщо позначити $U_{y*} = n_m U_y / U_f$, де $n_m = W_f / W_y$ – відношення чисел ефективних витків відповідних обмоток, то $U_y = U_{y.ном}$ при $U_{y*} = 1$ (U_{y*} , називають ефективним коефіцієнтом сигналу або коефіцієнтом керування). При ($U_{y*} = 0$ поле в зазорі ВД пульсуюче, при $U_{y*} \neq 0, 1$ або -1 – поле еліптичне. Для реверса двигуна необхідна зміна фази U_y на 180° або, що те ж саме, $U_{y*} < 0$.

При фазовому способі керування (рис. 9.1 б). $U_f = U_c$, $U_y = U_{y.ном}$, а фаза напруги, що подається на обмотку керування, змінюється в процесі регулювання ($\gamma = var$). При $\sin \gamma = 1$ поле в зазорі ВД кругове, при $0 < \sin \gamma < 1$ -еліптичне, при $\sin \gamma < 0$ відбувається реверс ВД.

При амплітудно-фазовому керуванні. (рис. 9.1 в) напруга на обмотці керування U_y змінюється як за амплітудою, так і за фазою.

Колекторні виконавчі двигуни постійного струму

Поряд з асинхронними ВД у системах автоматики застосовуються колекторні виконавчі двигуни постійного струму (ВДПС), що стійко працюють при будь-яких частотах обертання, мають лінійні механічні

характеристики і в більшості випадків лінійні регульовальні характеристики.

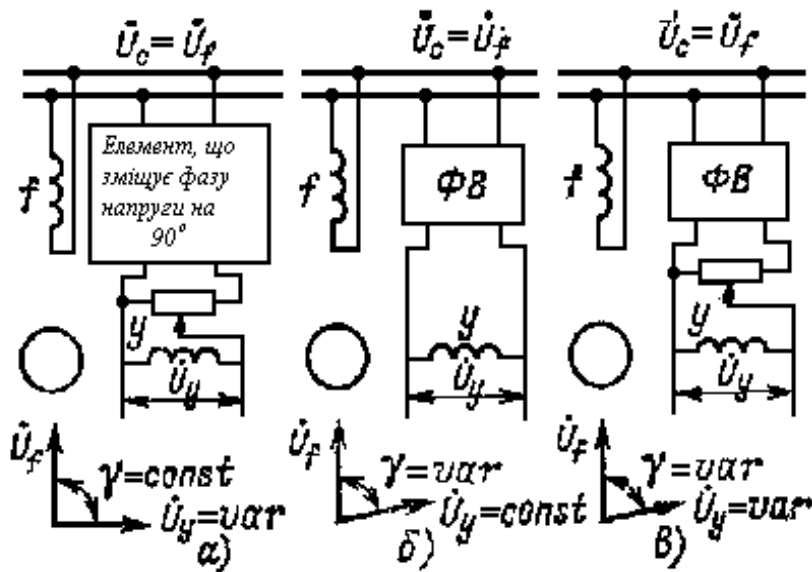


Рис. 9.1. Способи вмикання асинхронних ВД:

а – амплітудний; б – фазовий; в – амплітудно-фазовий

За масою і габаритами ВДПС у 2 – 3 рази менші асинхронних мікродвигунів. Регулювання частоти обертання ВДПС здійснюється досить просто і економічно.

Недоліки колекторних ВДПС пов'язані з наявністю щітково-колекторного апарата, тобто ковзних контактів. Іскріння під щітками призводить до появи радіоперешкод, для обмеження яких потрібні спеціальні фільтри. Знос, підгорання і забруднення щітково-колекторного апарата, що приводять до зниження надійності і скорочення терміну служби двигуна, роблять неможливим застосування колекторних мікродвигунів у системах, що працюють довгостроково без систематичного догляду. Сухе тертя щіток об колектор призводить до підвищення напруги зрушення. Крім того, підсилувачі постійного струму, застосовувані для керування ВДПС, мають значний дрейф нуля, що обмежує можливості застосування ВДПС у точних системах.

Проте колекторні ВДПС знайшли застосування в приводах автоматичних систем, що вимагають плавного регулювання частоти обертання в широкому діапазоні.

Класифікація колекторних ВДПС ведеться:

за способом збудження – з незалежним збудженням і з збудженням від постійних магнітів;

за способом керування – з якірним керуванням і з полюсним керуванням;

за конструктивним виконанням – ВД звичайного виконання і швидкодіючі.

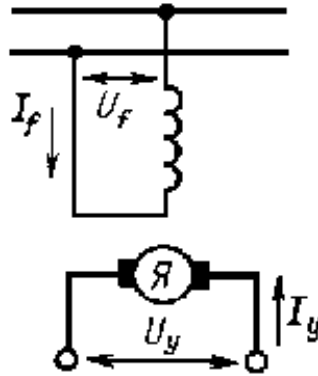


Рис. 9.2. Якірне керування ВДПС

Якірне керування. Цим способом керуються двигуни з незалежним збудженням і зі збудженням від постійних магнітів.

На рис. 9.2 наведено схему вмикання ВД з незалежним збудженням. На якірну обмотку ВД (обмотку керування) подається сигнал керування. Обмотка збудження підключена до мережі постійної напруги. За рахунок зміни напруги керування одержують необхідні обертаючі моменти і частоти обертання.

Принцип роботи ВДПС при якірному керуванні полягає в такому. Оскільки $U_f = const$, то і $I_f = const$, а отже, і $\Phi_f = const$, тому що $\Phi_f = C_f U_f$. При обертанні якоря провідники обмотки якоря у перетинають лінії магнітного поля, створюваного обмоткою f . В обмотці у наводиться ЕРС E_y , пропорційна частоті обертання n і потокові Φ_f :

$$E_y = C_e n \Phi_f = C_f C_e n U_f.$$

Струм якоря

$$I_y = \frac{U_y - C_e C_f n U_f}{R_y}$$

де R_y – опір якірної обмотки .

При взаємодії потоку збудження Φ_f із струмом якоря розвивається обертальний момент $M = C_m \Phi_f I_y = C_m C_f U_f I_y$.

Рівняння механічної характеристики двигуна у відносних одиницях має вигляд $M_* = U_{y*} - n_*$, тобто обертальний момент ВДПС при якірному керуванні є лінійною функцією частоти обертання n_* і керувального сигналу U_{y*} . Необхідно відзначити, що механічні характеристики не тільки лінійні, але і їхній нахил (жорсткість) при зміні напруги керування залишається постійним.

Рівняння регульовальної характеристики, ВДПС із якірним керуванням має вигляд $n_* = U_{y*} - M_*$. Лінійність визначає цінну властивість якірного керування ВДПС – частота обертання прямо пропорційна напрузі керування.

Контрольні питання

1. Призначення виконавчих двигунів та основні вимоги до них?
2. Особливості конструкції асинхронних двигунів різних типів?
3. Особливості амплітудного способу керування асинхронним двигуном?
4. Особливості фазового способу керування асинхронним двигуном?
5. Особливості амплітудно-фазового способу керування асинхронним двигуном?
6. Різновиди виконавчих двигунів постійного струму?
7. Основні способи керування двигунами постійного струму?

Рекомендована література

1. Головинський О.И. Основи автоматики. -М.: Высшая школа, 1987.
2. Тутевич В.Н. Телемеханика. - М.: Высшая школа, 1985.
3. Миловзоров В.П. Электромагнитная техника. - М.: Высшая школа, 1966.