Змістовий модуль 2 – Вимірювальні елементи та підсилювачі

Тема 4. Класифікація вимірювальних елементів.

Класифікація. В сучасних автоматичних системах [1] використовується безліч різноманітних пристроїв, що служать для одержання інформації про регульовані величини об'єктів.

Датчиком називається первинний елемент автоматичної системи, що реагує на зміну фізичної величини, яка характеризує процес, і перетворює цю величину у форму, зручну для використання наступними елементами системи. *Статичною характеристикою* датчика є залежність зміни вихідної величини $\mathbf{X_2}$ від зміни вхідної $\mathbf{X_1}$, тобто $\mathbf{X_2 = f(X_1).}$ Коефіцієнт підсилення датчика визначається крутістю статичної характеристики $k=dx_2/dx_1$ і звичайно називається чутливістю датчика **S**.

Більшість регуляторів призначена для управління неелектричними параметрами, тому задача датчика звичайно складається не тільки, щоб вимірювати дану величину (наприклад, тиск або рівень), але і перетворювати її зміни в електричну форму. Це може бути будь-яка характеристика електричного ланцюга: активний опір, індуктивність, ємність, напруга, сила струму і т.п.

Електричні датчики можна класифікувати за тими величинам, які вони вимірюють (датчики тиску, датчики рівня і т.п.), або за тими електричними характеристиками, у які перетворяться вимірювані величини (датчики активного опору, датчики індуктивності і т.п.). Більш раціональною є класифікація за другою ознакою, тому що, наприклад, два датчики індуктивності, що служать для виміру різних величин, подібні між собою за конструкцією і мають наближені експлуатаційні характеристики. Багато неелектричних величин за допомогою первинного датчика попередньо перетворюють в механічне зміщення, тому електричні датчики виготовляються у виді пристроїв, що перетворюють це зміщення в ту або іншу електричну

величину. Бувають наступні види датчиків: *активного опору, індуктивності, ємності, напруги, струму, фази, частоти, числа імпульсів та тривалості імпульсу.*

Датчики активного опору. ***Потенціометричні*** *датчики* застосовують для виміру зміщень. Їхніми основними перевагами є простота конструкції і можливість роботи без наступного посилення сигналу. До основних *недоліків* відносяться наявність ковзного електричного контакту, відносно великі зміщення повзунка і значні зусилля для здійснення цих зміщень. Простий реостат, що змінює струм в електричному ланцюзі при зсуві повзунка, майже не використовується в автоматиці через значну нелінійність його характеристик. Звичайно датчики включаються за схемою потенціометру (рис. 3.1, *а*). У цьому випадку характеристика датчика може бути наближено лінійною за рахунок правильного вибору режиму роботи потенціометра.

Статичною характеристикою потенціометричного датчика називається залежність напруги $\mathbf{U_{вих}}$ на опорі навантаження $\mathbf{R_н}$ від зміщення повзунка потенціометру $\mathbf{X_1}$, тобто $\mathbf{U_{вих} = f(X_1)}$. При рівномірному намотуванні потен-

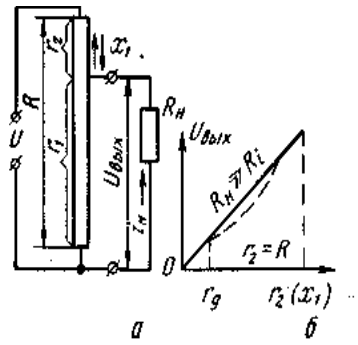


Рисунок 3.1 – Датчик активного опору і його характеристика

ціометра на каркасі постійного перетину величина опору $\mathbf{r_2}$ пропорційна зміщенню повзунка $\mathbf{X_1}$, тобто $\mathbf{r_2 = kX_1}$.

У тому випадку, коли опір навантаження набагато більший за внутрішній опір потенціометру, статична характеристика потенціометру зобразиться прямою лінією (рис. 3.1, б). Пунктиром показаний випадок, коли $\mathbf{R}_н$ порівнянний за величиною з внутрішнім опором датчика. При роботі з таким датчиком необхідно оцінювати похибку вимірів, що можлива через нелінійність характеристик, або обмежувати робочу ділянку інтервалом характеристики, що має малу нелінійність. Похибка практично дорівнює нулеві, коли напруга з потенціометра подається, наприклад, на вхід електронного підсилювача.

Для одержання статичної характеристики, що реагує на знак вхідного сигналу, використовуються диференційні схеми потенціометричних датчиків. При цьому вихідна напруга знімається з повзунка і середньої точки потенціометру або опір навантаження включається в діагональ мостової схеми, утвореної двома потенціометричними датчиками. Динамічні властивості датчика визначаються видом навантаження. При навантаженні, що є активним опором, він являє собою безінерційну ланку.

Тензометри виготовляються або з тонкого дроту, або з тензоліту. У звичайному виконанні *тензометричний* датчик являє собою тонкий дріт, складений у виді ґрат і обклеєний з двох сторін тонким папером. Такий елемент приклеюється міцним клеєм до деталі і служить для виміру її деформації. Спосіб виміру заснований на зміні опору дроту при її розтяганні або стиску. *Тензолітовий* датчик виконується у вигляді стріжню діаметром до 1 мм, що також наклеюється на деталь і змінює свій опір при її деформації.

Останнім часом розроблені кремнієві тензодатчики, що виготовляються на основі інтегральних технологій на сапфіровій підкладці.

Термоопори використовують властивість деяких матеріалів змінювати електричний опір **R** за зміни температури. Характеристика датчиків є нелінійною. Останнім часом у якості т*ермоопорів* набули застосування *термістори*, що виготовляються з напівпровідників, що представляють собою оксіди, сульфіди, карбіди металів, які мають великий негативний коефіцієнт.

Термістори виготовляють шляхом пресування і випалу здрібнених часток матеріалів і покривають захисним шаром емалі або лаку, що мають той же коефіцієнт розширення.

Датчики індуктивності. Принцип роботи датчиків заснований на зміні індуктивного опору котушки із сердечником. Датчики індуктивності мають наступні *переваги*:

– проста конструкція і надійність у роботі;

– не мають ковзних контактів;

– можуть працювати на змінному струмі промислової частоти.

Основною областю застосування датчиків є вимір кутових і лінійних механічних зміщень. При цьому зміна вхідної величини перетворюється в зміну індуктивності котушки внаслідок зміщення якоря, сердечника або самої котушки, що призводить до зміни напруги або струму на виході датчика.

Найпростіший індуктивний датчик (**однотактний**) являє собою котушку індуктивності із сердечником 2 і рухомим якорем 3, відділеним від сердечника повітряним зазором (рис. 3.2, *а*). Котушка індуктивності із сердечником 1 (статор) закріплюється нерухомо, а якір 2 з’єднується механічно з рухомою частиною об’єкта управління, зміщення якої потрібно перетворювати в електричний сигнал. При зміщенні якорю змінюється опір

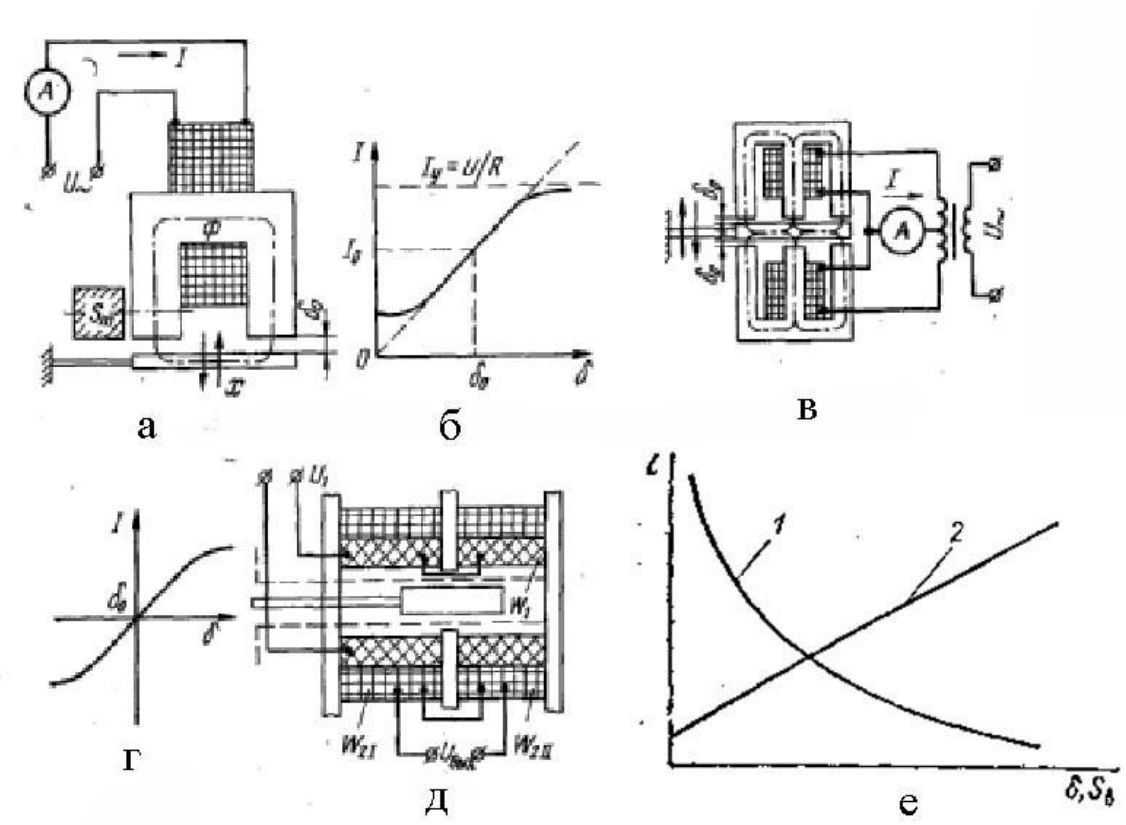


Рисунок 3.2 – Датчики індуктивності

магнітного ланцюга датчика внаслідок зміни повітряного зазору δ_0 між статором і якорем (при вертикальному зміщенні якоря) або площини повітряного зазору $A_в$ (при горизонтальному). Опір магнітного ланцюга датчика $R_м$ складається з опору ділянки ланцюга із сердечником $R_{ст}$ і опору ділянки ланцюга з повітряним зазором $R_в$. Магнітна проникність сердечника значно перевищує магнітну проникність μ_0 повітря, тому опір магнітного ланцюга датчика $R_М$ визначається в основному опором ділянки ланцюга з повітряним зазором:

$$R_м \approx R_в = \frac{2\delta_0}{\mu_0 A_в} \qquad (3.1)$$

Індуктивність котушки датчика **L** (якщо зневажити потоком розсіювання):

$$L = \frac{w \cdot \Phi}{I} = \left(\frac{w^2}{2\delta_0}\right) \cdot \mu_0 \cdot A_в, \qquad (3.2)$$

де **w**– число витків котушки датчика, **Ф** – змінний магнітний потік; **I**– струм у котушці датчика.

В індуктивних датчиках з повітряним зазором, що змінюється, статична характеристика $L=f(\delta_0)$ нелінійна (рис. 3.2, е , крива 1) і за великих зазорів (δ_0 > 1 мм) чутливість датчика зменшується. Такі датчики використовують при обмеженому діапазоні зміщення якорю (до 1 мм), а початкова робоча точка вибирається в межах характеристики, де вона має найбільшу крутість і наближається до лінійної. Чутливість датчиків з повітряним зазором, що змінюється, висока – до 0,2 мкм.

Статична характеристика датчика, що представляє собою залежність вихідної величини струму **I** від вхідної (зазору δ_0), тобто $I=f(\delta_0)$, показана на рис. 3.2, б. На характеристиці індуктивного датчика є деяка нелінійність за рахунок струму при нульовому повітряному зазорі і його прагненні до значення насичення при великих зазорах.

У розглянутого датчика індуктивності для зміщення якоря в обох напрямках необхідний початковий повітряний зазор δ_0 , тобто початковий струм I_0 , через що виникають значні похибки вимірів, викликані коливаннями температури і живильної напруги. Для усунення цих недоліків, а також електромеханічного зусилля притягання якорю, що залежить від величини повітряного зазору, застосовуються диференційні датчики.

В індуктивних датчиках із змінною площиною повітряного зазору статична характеристика $L= f(A_в)$ лінійна (рис. 3.3, е, крива 2), діапазон зміщень якоря ширше – до 8 мм, але чутливість менша – до 0,3 мкм. Зміна індуктивності котушки датчика **L** призводить до зміни її індуктивного опору X_L, і, отже, відбувається зміна повного опору котушки:

$$Z = \sqrt{R_a^2 + X_L^2},$$

де $\mathbf{R_a}$ – активний опір котушки датчика.

Струм $\boldsymbol{I}$, що протікає в котушці датчика під дією прикладеної напруги $\mathbf{U\sim}$, також змінюється при зміщенні якоря і може служити вихідним сигналом датчика (вихідною характеристикою).

Розглянуті індуктивні датчики мають *переваги:* високу чутливість і надійність, практично необмежений термін служби, велику потужність вихідного сигналу (до кількох ватів), що дозволяє у ряді випадків не застосовувати підсилювач. *Недоліки* індуктивних датчиків: нереверсивна характеристика, невеликий діапазон зміщень якоря, наявність електромагнітної сили притягання якоря до статора, вплив коливань амплітуди і частоти напруги живлення.

Ці недоліки цілком або частково відсутні у ***диференційних*** індуктивних датчиків. Схема такого датчика показана на рис. 3.2, *в.* Електромеханічні зусилля, що діють на якір від двох котушок, у значній мірі взаємно компенсуються практично у всьому діапазоні вимірюваних зміщень. Котушки індуктивності включаються в мостову або диференційну схему. Характеристика диференційного датчика показана на рис. 3.2, *г.* При застосуванні фазочутливих спрямлюючив диференційний датчик показує також напрямок зміщення якорю від нульового положення, тому що струм $\boldsymbol{I}$ змінює при цьому фазу. Розглянуті датчики використовуються для виміру зміщень порядку десятих часток міліметра.

Диференційні індуктивні датчики мають більш високу точність перетворення і чутливість. Статична характеристика цих датчиків лінійна в більшому діапазоні зміщень і реверсивна. На рис. 3.3 представлений *диференційний трансформаторний* датчик з кутовим зміщенням якоря. Первинна обмотка датчика $\mathbf{W_1}$ розташована на центральному стрижні сердечника 1 і підключена до джерела змінного струму. Вторинні обмотки $\mathbf{W_{2а}}$ і $\mathbf{W_{2б}}$ розташовані на крайніх стрижнях і з’єднуються зустрічно. Струму у

обмотці $\mathbf{W_1}$ створює змінний магнітний потік $\mathbf{\Phi_1}$, який розгалужується на два потоки $\mathbf{\Phi_{1а}}$ і $\mathbf{\Phi_{1б}}$. За симетричного положення якоря 2 стосовно статора датчика (сердечник 1) магнітні потоки рівні і ЕРС (електрорушійні сили), що індукують у вторинних обмотках, будуть також рівні, а фази цих ЕРС

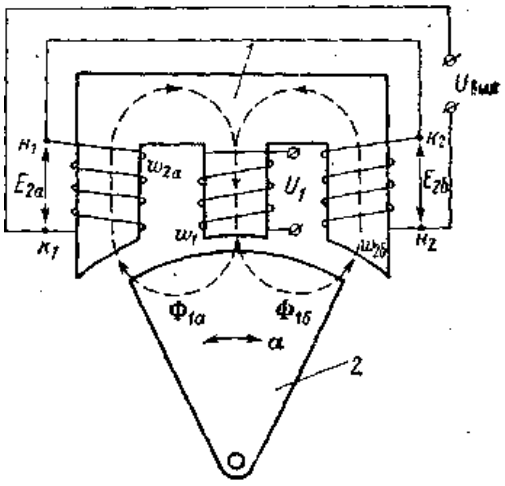


Рисунок 3.3 – Диференційний трансформаторний датчик з кутовим зміщенням якоря

протилежні (за рахунок зустрічного включення обмоток $\mathbf{W_{2а}}$ і $\mathbf{W_{2б)}}$ і напруга на виході датчика дорівнює нулеві. При повороті якоря, що механічно зв'язаний з рухомою частиною об'єкта управління, змінюються площини поперечного перерізу повітряних зазорів між якорем і крайніми стрижнями сердечника. У результаті цього зміняться опори магнітним потокам та їх величини: один з них збільшується, а інший зменшується. У вторинних обмотках $\mathbf{E_{2а}}$ і $\mathbf{E_{2б}}$ також змінюються пропорційно зміні потоків. На виході датчика з'явиться напруга $\mathbf{U_{вих} = E_{2а} – E_{2б}}$, а її фаза буде визначатися фазою більшої з ЕРС. Таким чином, у робочій зоні характеристика такого датчика буде реверсивною і лінійною. Чутливість і робоча зона диференційного трансформаторного датчика в два рази вище, а ніж однотактного. Точність перетворення у диференційних трансформаторних датчиків вище, тому що через симетричність

конструкції і схеми датчика частково взаємно компенсуються похибки від зміни навколишньої температури і частоти джерела живлення.

Трансформаторні датчики індуктивності (рис. 3.2,д) з рухомим сердечником містять дві котушки: одна $\mathbf{W_1}$ живиться напругою $\mathbf{U_1}$ змінного струму, а інша, що складається з двох частин $\mathbf{W_{2I}}$ і $\mathbf{W_{2II}}$, включених зустрічно один одному, є вихідною, і з неї знімається напруга $\mathbf{U_{вих}}$, пропорційна зміщенню сердечника. При середньому положенні сердечника напруга $\mathbf{U_{вих} = E_1 - E_2 = 0}$, оскільки $\mathbf{E_1}$ і $\mathbf{E_2}$, що індукують в обмотках $\mathbf{W_{2I}}$ і $\mathbf{W_{2II}}$ (рис. 3.2, *д)*, рівні між собою та протифазні. При зсуві сердечника від середнього положення рівновага між ЕРС порушується, в результаті чого на виході датчика з'являється напруга $\mathbf{U_{вих}}$. Амплітуда цієї напруги пропорційна величині зсуву сердечника від нейтрального положення, а фаза – напрямкові цього зсуву.

Статична характеристика цього датчика має такий же вид, як у датчика з рухомим якорем, але з трохи більшою лінійною ділянкою (рис. 3.2, *г)*. Датчики можуть бути використані для виміру зміщень порядку десятків міліметрів.

Також випускаються датчики, у яких вихідна котушка може повертатися щодо сердечника. Такі датчики називаються *феродинамічними*.

До *переваг* трансформаторних і феродинамічних датчиків відносяться можливість великих зміщень якоря і відсутність електричного зв'язку між вимірювальним ланцюгом і ланцюгом електричного живлення (між ними існує лише магнітний зв'язок).

Ємнісні датчики являють собою звичайний плоский або циліндричний конденсатор, зміна ємності якого відбувається або за рахунок зміщення однієї з пластин, або за рахунок зміни діелектричної проникності $\boldsymbol{\varepsilon}$ середовища, що знаходиться між пластинами. При зміщенні змінюється відстань $\boldsymbol{\delta}$ між ними

або площіни **А**, що взаємно перекриваються. Ємність конденсатора виражається залежністю:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon A / \delta, \qquad (3.3)$$

де ε_0– абсолютна діелектрична проникність вакууму.

Всі ємнісні датчики працюють на змінному струмові високої частоти і вимагають застосування додаткових підсилювачів напруги, тому що сигнал, одержуваний від них, дуже малий. Для збільшення чутливості такі датчики виконуються диференційними (рис. 3.4, *а*), тобто складаються з двох нерухомих 1 і 3 та однієї рухомої 2 пластин. При зсувіі рухомої пластини

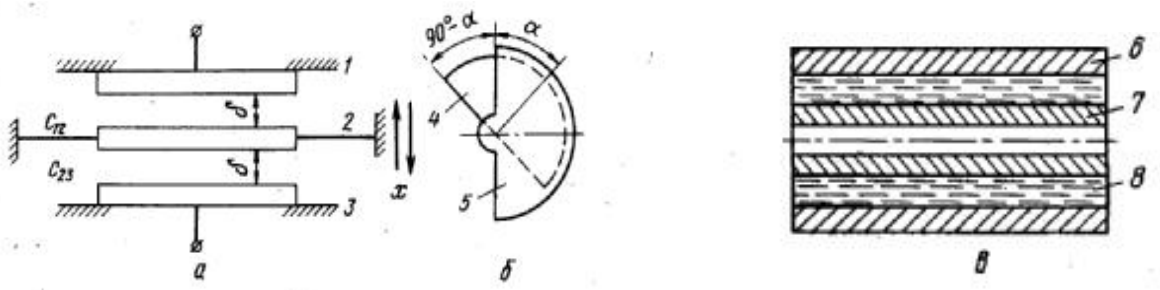


Рисунок 3.4 – Ємнісні датчики

змінюються ємності C_{12} і C_{23}. Якщо зміщення пластин x мале в порівнянні з початковим зазором δ між пластинами, то нелінійну залежність (3.3) можна в діапазоні зміни зазору $\delta \pm x$ спрямити. Ємнісний датчик зі змінюваною площиною пластин (рис. 3.4, б) має ряд нерухомих 5 і ряд рухомих 4 пластин. Поворот рухомих пластин стосовно нерухомих змінює величину активної площіни датчика, що призводить до зміни його ємності. Ємність є лінійною функцією кута повороту α рухомої пластини щодо нерухомої, що, безумовно, є перевагою датчика. Для диференційного ємнісного датчика з двома

нерухомими та однієї рухомою пластинами також одержимо однакові за величиною і різні за знаком зміни ємності.

Ємнісні датчики із змінною діелектричною проникністю середовища можуть застосовуватися для виміру концентрації електролітів або рівня рідини. Звичайно такі датчики виконуються у вигляді двох коаксіальних циліндрів 6, 7 (рис. 3.4, *в)*, між якими знаходиться вимірювана рідина 8. При зміні концентрації електроліту або рівня рідини лінійно змінюється ємність датчика.

Датчики напруги. У датчиків напруги величина вихідної напруги пропорційна вимірюваній величині. До датчиків напруги відносяться сельсини, п'єзоелектричні датчики, термопари, тахогенератори та ін.

Сельсини виконуються як асинхронні машини змінного струму. У пазах статора покладена трифазна статорна обмотка, причому окремі фазні обмотки зміщені одна відносно іншої на 120°. Ротор сельсина має однофазну або трифазну обмотку. Деякі типи сельсинів виконуються з трифазною обмоткою на роторі та однофазною – на статорі. Сельсини виконуються контактними і безконтактними.

Схема з'єднання сельсинів в ***індикаторному режимі*** наведена на рис. 3.5. Основною характеристикою індикаторного режиму роботи передачі на двох сельсинах є залежність синхронізуючого моменту від кута неузгодженості між роторами сельсина-датчика і сельсина-приймача. Якщо ротор **Р** сельсина-датчика (СД) розвернути щодо статора **С** на кут **α**, а ротор сельсина-приймача (СП) на кут **β**, то в окремих фазових обмотках статорів сельсинів індукують ЕРС: датчика $\mathbf{E_{1д} \ldots E_{3д}}$ і приймача $\mathbf{E_{1п} \ldots E_{3п}}$, величини яких пропорційні косинусам цих кутів:

$$\mathbf{E_{1д} = E_м \cos \alpha; \quad E_{1п} = E_м \cos \beta;}$$
$$\mathbf{E_{2д} = E_м \cos(\alpha + 120°); \quad E_{2п} = E_м \cos (\beta + 120°);} \qquad (3.4)$$
$$\mathbf{E_{3д} = E_м \cos (\alpha + 240°); \quad E_{3п} = E_м \cos (\beta + 240°),}$$

де $\mathbf{E_м}$ – максимальне значення ЕРС фазової обмотки.

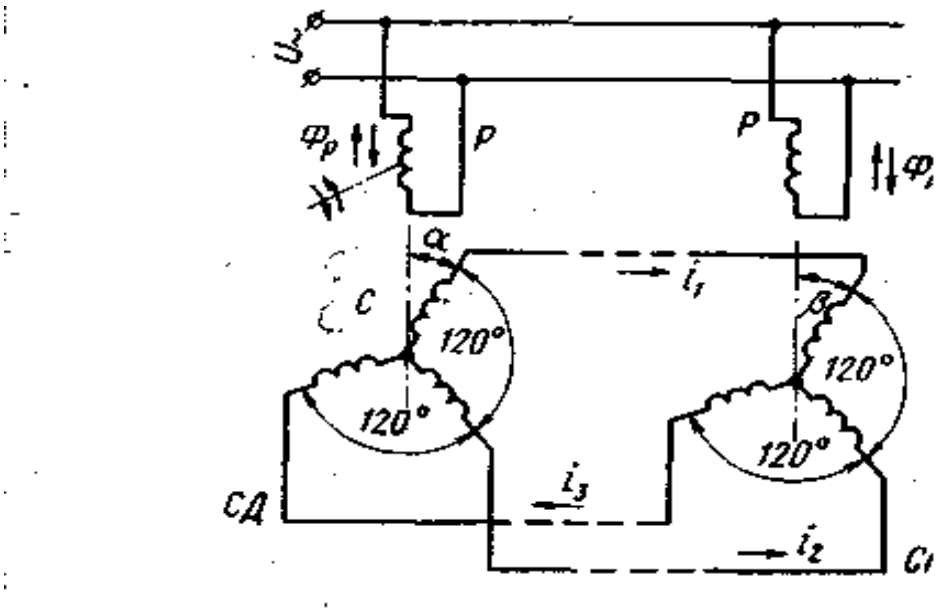


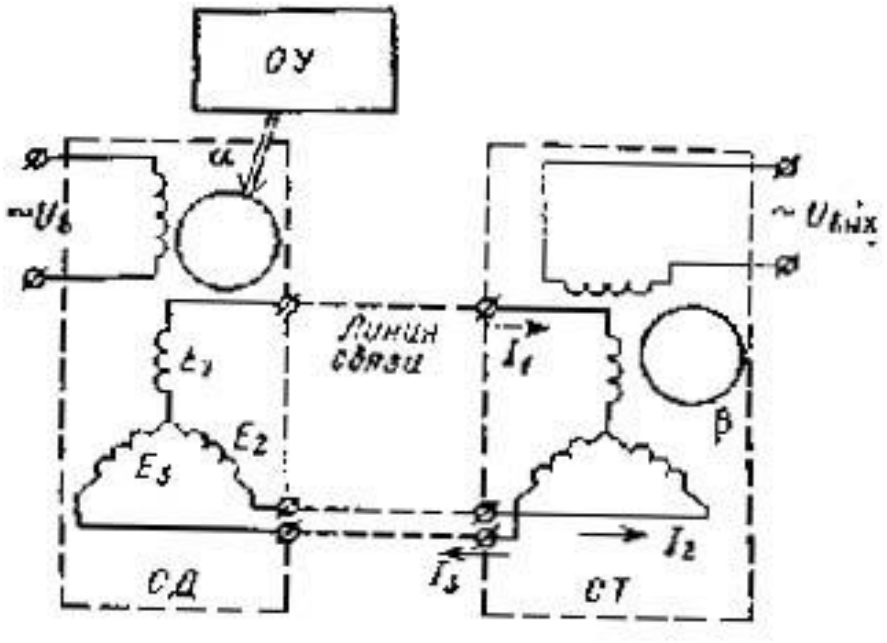
Рисунок 3.5 – Схема з’єднання сельсинів у індикаторному режимі

За однакового положення роторів СД і СП (тобто $\boldsymbol{\alpha = \beta}$) величини ЕРС, що індукують у фазових обмотках 1...3 та 1’…3’, рівні і струми в ланцюзі статорів відсутні ($\boldsymbol{I_1 = I_2 = I_3 = 0}$). За наявності кута неузгодженості $\boldsymbol{\varphi = \alpha - \beta}$ між положенням роторів СД і СП значення ЕРС різні і у ланцюзі статорів виникнуть зрівняльні струми. Взаємодія цих струмів з потоками обмоток роторів $\boldsymbol{\Phi_р}$ створює на осях СД і СП синхронізуючий момент, що прагне відновити рівновагу у системі.

У *трансформаторному режимі* (рис. 3.6) ротор СД механічно зв’язаний із об’єктом управління ОУ. Напруга збудження від однофазної мережі подається на обмотку ротора . Змінний струм, що протікає по обмотці ротора, створює пульсуючий магнітний потік, під дією якого в трифазній вторинній обмотці статора індукують ЕРС:

$$\mathbf{E_1 = E_м \cos\alpha; \quad E_2 = E_м \cos(\alpha + 120°); \quad E_3 = E_м \cos(\alpha + 240°),}$$

де E_1, E_2, E_3 – ЕРС у відповідних фазах вторинної обмотки; α – кут між віссю фазної обмотки і напрямком магнітного потоку збудження. В фазних ланцюгах сельсинів протікають струми I_1, I_2, I_3, пропорційні фазним E_1, E_2, E_3. У трифазній обмотці СТ утворюється пульсуючий магнітний потік, вісь якого



о

Рисунок 3.6 –Принципова схема трансформаторного включення сельсинів

займає стосовно трифазної обмотки таке ж положення, як і в СД. В обмотці збудження СТ пульсуючий магнітний потік індукує ЕРС: $E_{вих} = E_м \cos \varphi$, де $E_м$ – максимальне значення ЕРС при узгодженому (синхронному) положенні роторів сельсинів, тобто при $\varphi = \alpha - \beta = 0$.

Якщо закріпити нерухомо ротор СТ, то ЕРС буде пропорційна кутові повороту ротора СД. Така характеристика датчика кута незручна для використання в устроях автоматики: вона нереверсивна, нелінійна, чутливість (крутість характеристики) при малих кутах повороту низька, при погодженому положенні напруга на виході датчика максимальна. У зв’язку з цим за погоджене положення сельсинів приймають таке положення, коли їхні ротори

зміщені на кут 90°. Тоді $\mathbf{E_{вих} = E_м cos\ (90° - \alpha) = E_м\ sin\alpha}$. Характеристика датчика кута на сельсинах стала реверсивною: за зміни напрямку повороту ротора СД від узгодженого положення фаза ЕРС змінюється на 180. Чутливість такого датчика максимальна, а вихідна напруга при узгодженому положенні сельсинів дорівнює нулеві.

Датчики кута на сельсинах застосовуються у спостережних системах (пристроях електроприводу). Вони мають високу точність і надійність. Відстань між СД і СТ може бути до кількох десятків (і навіть сотень) метрів.

Обертові (поворотні) трансформатори. На статорі і роторі обертового трансформатора (ОТ) розміщується по дві розподілені обмотки, магнітні осі яких взаємно перпендикулярні (рис. 3.7, б). Ротор ОТ може повертатися на

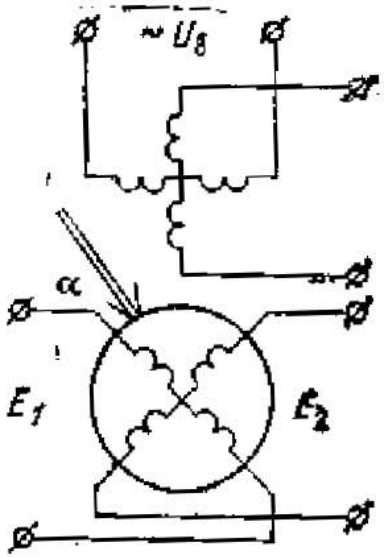


Рисунок 3.7 – Принципова схема обертового трансформатора

деякий довільний кут стосовно статора. Статор звичайно закріплюється нерухомо, а ротор механічно з'єднується з рухомою частиною ОУ, поворот якого потрібно перетворити в електричний сигнал. Так само як і сельсини, ОТ можуть бути контактними і безконтактними. Принцип дії ОТ заснований на зміні коефіцієнтів взаємоіндукції між обмотками статора і ротора при повороті ротора. Як датчики кута використовуються ОТ, у яких залежність коефіцієнтів взаємоіндукції від кута повороту ротора α відповідає законові синуса і косину-са, синусно-косинусні обертові трансформатори (СКОТ), і лінійні обертові трансформатори (ЛОТ). У СКОТ ширина лінійної зони (з точністю до 1 %) складає ±14°, а у ЛОТ – ±60°.

У залежності від схеми включення вихідним сигналом ОТ може бути амплітуда змінної напруги або кут зміщення фаз між двома напругами. Відпо-відно до цього режим роботи ОТ називається або *амплітудним*, або режимом *фазообертача*. Для підвищення точності перетворення застосовуються ОТ з електричною редукцією (редуктосіни і индуктосіни). Принцип електричної редукції полягає в тім, що за малий кут повороту ротора амплітуда або фаза вихідної напруги змінюється на один період, а при повороті ротора на 360° число періодів дорівнює коефіцієнтові електричної редукції.

Індукційний редуктосін являє собою безконтактний СКОТ з електричною редукцією. Статор його зібраний із пластин електротехнічної сталі з великим числом зубців, а ротор виконується у вигляді зубцюватого кільця з електротехнічної сталі. Відношення числа зубців статора до числа зубців ротора (коефіцієнт електричної редукції) у найпростішому випадку дорівнює 4/3 або 4/5. На зубцях статора 4 (рис. 3.8) намотана первинна обмотка 1-1' та дві вторинні диференційні обмотки 2-2' та 3-3'. При живленні первинної обмотки синусоїдальною напругою у вторинних обмотках індукують ЕРС, амплітуди яких змінюються у функції кута повороту ротора 5 із просторовим зміщенням у 1/4 зубцьового розподілу

ротора. Поворотові ротора на кут, що відповідає зубцьовому розподілові, відповідає повний період зміни амплітуди вихідної напруги. За поворотом ротора на один оберт число періодів зміни амплітуди вихідної напруги дорівнює числу зубців ротора. Для

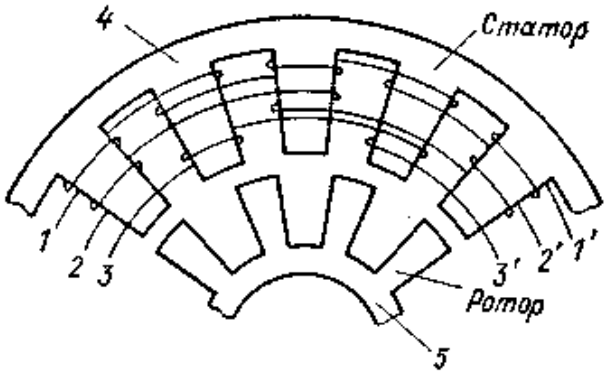


Рисунок 3.8- Конструкція індукційного редуктосіна

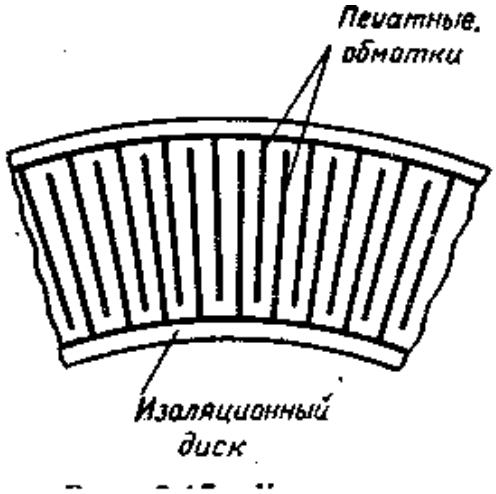


Рисунок 3.9- Конструкція поворотного індуктосіна

використання в цифрових САУ створюються індукційні редуктосіни із коефіцієнтом електричної редукції, кратним $\mathbf{2^n}$ (n = 1, 2, 3, ...): 32; 64; 128; 256. Так само як і СКОТ, індукційні редуктосіни можуть працювати в двох режимах: амплітудному і фазообертаючому. У першому випадку вихідний сигнал редуктосіна – напруга, амплітуда якої пропорційна кутові повороту ротора: $\mathbf{E_{вих} = E_м \cos \varphi,}$ де $\mathbf{E_м}$ – максимальна вихідна напруга (при повороті, що дорівнює 0°); $\mathbf{\varphi = z_p \alpha}$ (тут $\mathbf{z_p}$ – число зубців на роторі).

В іншому випадку вихідний сигнал редуктосіна – напруга, амплітуда якої постійна, а фаза пропорційна кутові повороту ротора $\mathbf{\varphi}$.

Перевагами індукційних редуктосінів є висока точність, надійність і довговічність. За коефіцієнта електричної редукції у 32 похибка самого редуктосіна складає близько однієї кутової хвилини. Якщо цей коефіцієнт дорівнює 128 або 256, то може бути отримана точність у кілька часток кутової хвилини**.**

Індуктосіни є одним із різновидів індукційних редуктосінів. Існують поворотні і лінійні індуктосіни. Ротор і статор поворотного індуктосіна являють собою плоскі диски із ізоляційного матеріалу (найчастіше зі скла), на які нанесені друковані обмотки. Диски розташовані співвісно і паралельно і можуть повертатися один щодо іншого. Магнитопроводу індуктосін не має. Обмотки індуктосіна являють собою ряд радіальних струмопровідних пластин, з'єднаних по черзі у центрі диску і на його периферії (рис. 3.9). Найбільш поширені поворотні індуктосіни, на роторі яких розташована однофазна багатополюсна обмотка. На статорі (нерухомий диск) розташовується двофазна багатополюсна секційна обмотка. Обмотки статора зміщені на половину полюсного розподілу ротора. Для одержання симетричних обмоток число друкованих провідників на роторі і у секції статора повинне бути парним.

Перевагою таких датчиків кута є висока точність (при коефіцієнті електричної редукції більше 128 похибка виміру складає ±5...10"); *недоліками*: високі вимоги до точності виготовлення і збирання, мале значення вихідного сигналу (кілька мілівольт за частоти живлення 10 кГц). Вони знаходять широке застосування як датчики зворотного зв'язку в замкнених системах чисельного програмного керування автоматичними маніпуляторами.

П'єзоелектричні датчики працюють на основі використання п'єзоелектричного ефекту, властивого деяким кристалам. Для таких датчиків звичайно застосовується кварц, тому що він при наявності сильно вираженого п'єзоелектричного ефекту одночасно має високу механічну міцність, малу залежність властивостей від температури і високі ізоляційні

властивості. З кристалу кварцу вирізують відповідним чином орієнтовані стосовно його осей пластинки, які розміщують між металевими електродами. Під дією сили **F** в напрямку електричної осі кристалу на його поверхнях, перпендикулярних цієї осі, з'являються заряди, пропорційні прикладеному зусиллю і не залежні від геометричних розмірів.

Мала величина заряду створює небезпеку його швидкого витоку через опір ізоляції, тому п'єзоелектричні датчики можуть застосовуватися для виміру параметрів швидко протікаючих динамічних процесів.

Тахометричні датчики (тахогенератори) застосовуються для перетворення в електричний сигнал частоти обертання рухомих частин ОУ. Тахогенератор являє собою малопотужну електричну машину. Принцип дії тахогенераторів заснований на законі електромагнітної індукції. За зміни магнітного потоку, створюваного постійним магнітом або електромагнітом, в обмотці тахогенератора індукує ЕРС, пропорційна швидкості (частоті) зміни магнітного потоку. Зміну магнітного потоку можна одержати двома методами: зміщуючи магніт щодо обмотки або навпаки обмотку щодо магніту.

Тахогенератор постійного струму складається з двох основних частин: нерухомого статора і рухомого якоря. Магнітний потік **Ф** створюється постійним магнітом (замість постійного магніту може бути електромагніт постійного струму). Якір тахогенератору має обмотку, що запресована в стінки пустотного пластмасового циліндру. В деяких конструкціях якір являє собою масивний циліндр із листової електротехнічної сталі, у пазах якого лежить обмотка. При обертанні якоря, зв'язаного механічно з рухомою частиною ОУ, у його обмотці індукує ЕРС, яка залежить від частоти обертання якоря, а полярність – від напрямку обертання:

$$\mathbf{E=k\Phi\omega}, \qquad (3.5)$$

де **k**–постійний коефіцієнт, що враховує конструктивні параметри тахогенератора; **Ф** – магнітний потік постійного магніту (електромагніту);

ω – кутова швидкість.

Ця залежність відповідає режимові холостого ходу при опорі навантаження $\mathbf{R_н \to \infty}$. З урахуванням навантаження напруга, що знімається з обмотки обертового якоря за допомогою колектора 4 і щіток 5, буде менша на спадання напруги на активному опорі обмотки якоря:

$$\mathbf{U=E - I_н R_я,} \qquad (3.6)$$

де $\mathbf{I_н}$ – струм, що протікає по навантаженню; $\mathbf{R_я}$– активний опір обмотки якоря.

Переваги тахогенераторів постійного струму: лінійність і реверсивність характеристики; великий рівень вихідного сигналу; відсутність джерела живлення (при використанні для збудження постійного магніту). *Недоліки*: недостатньо висока надійність і довговічність, обумовлені наявністю колектора і щіток; вплив навколишньої температури; перешкоди для радіоапаратури.

Тахогенератори змінного струму. У *синхронних* тахогенераторів (рис. 3.10, *а*) магнітний потік створюється постійним магнітом, виконаним у

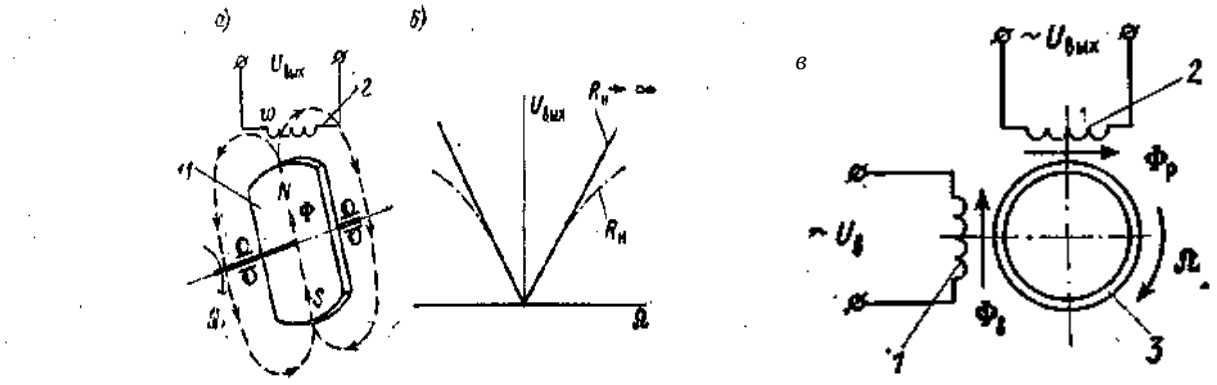


Рисунок 3.10 – Конструктивна схема (*а*) і статична характеристика (б) синхронного і схема асинхронного (*в)* тахогенераторів

вигляді обертового ротора 1, зв'язаного механічно з рухомою частиною ОУ. У нерухомому статорі 2 розміщюють однофазну або трифазну обмотку, у якій при обертанні ротора індукує ЕРС синусоїдальної форми. Статична характеристика синхронного тахогенератора лінійна, симетрична та нереверсивна (рис. 3.10,б) Зміна частоти обертання ротора тахогенератора змінює одночасно амплітуду і частоту ЕРС. Визначити фазу вихідної напруги при зміні напрямку обертання ротора тахогенератора у цьому випадку неможливо. Частота ЕРС пропорційна частоті обертання ротора, тому вихідним сигналом синхронного тахогенератора поряд з амплітудою може бути і частота, яку можна виміряти з високою точністю.

Переваги синхронних тахогенераторів: лінійність статичної характеристики; високий рівень вихідного сигналу (до декількох десятків вольтів); висока надійність; відсутність джерела живлення.

Недоліки: порівняно великий момент інерції ротора; нереверсивність характеристики; вплив навколишньої температури.

В ***асинхронних тахогенераторів*** (рис. 3.10, *в)* на статорі розташовані дві обмотки 1 та 2, магнітні осі яких зміщені в просторі по відношенню один до одного на 90°. Ротор 3 виконується у вигляді пустотного циліндру з немагнітного металу – сплаву алюмінію. Одна з обмоток статора – обмотка збудження 1 включається в мережу змінного струму $\mathbf{U_в}$. Друга обмотка 2 є вихідною (сигнальною) обмоткою. Змінний струм, що протікає в обмотці збудження, створює пульсуючий з частотою мережі магнітний потік $\mathbf{Ф_в}$**.** Напрямок цього потоку збігається з віссю обмотки збудження. У вихідній обмотці під дією цього потоку ЕРС не індукує, тому що напрямок магнітного потоку $\mathbf{Ф_в}$ і вісь вихідної обмотки взаємно перпендикулярні. При обертанні ротора з частотою $\boldsymbol{\omega}$ у ньому індукує ЕРС обертання $\mathbf{E_р}$, пропорційна магнітному потокові збудження $\mathbf{Ф_в}$ і частоті обертання ротора $\boldsymbol{\omega}$. Під дією цієї ЕРС у роторі протікає струм $\mathbf{I_р}$ і виникає магнітний потік $\mathbf{Ф_р}$, що

пульсує з частотою мережі і зміщений у просторі стосовно магнітного потоку $\mathbf{Ф_в}$ на 90°. Напрямок магнітного потоку $\mathbf{Ф_р}$ збігається з віссю вихідної обмотки . У вихідній обмотці під дією $\mathbf{Ф_р}$ індукує ЕРС:

$$\mathbf{E_{вих} = k_1 Ф_р \omega,}$$

де $\mathbf{k_1}$ – постійний коефіцієнт, що залежить від конструктивних параметрів тахогенератора.

Таким чином, амплітуда $\mathbf{E_{вих}}$ пропорційна частоті обертання ротора $\boldsymbol{\omega}$. Частота ЕРС постійна і дорівнює частоті напруги на обмотці збудження. Фаза ЕРС вихідної обмотки $\mathbf{E_{вих}}$ змінюється на 180° за зміни напрямку обертання ротора на протилежне. При роботі на навантаження $\mathbf{R_н}$ характеристика відхиляється від лінійного закону (рис. 3.10, *б)*.

Переваги асинхронних тахогенераторів: лінійність і реверсивність статичної характеристики; високий рівень вихідного сигналу; малий момент інерції ротора; висока надійність і довговічність.

Недоліки: необхідність у джерелі живлення для обмотки збудження і вплив навколишньої температури.

Термопари застосовуються для точного виміру високих (до 2500 °С) температур. Термопара складається з двох різнорідних термоелектродів. З однієї сторони кінці термоелектродів з'єднані (запаяні), а другі вільні. Спай міститься в зоні виміру і називається гарячим, а вільні кінці (їх називають холодним спаєм) підключаються до вимірювального прибору. До *переваг* термопар, крім можливості виміру високих температур, відносяться порівняно мала інерційність; простота і малі габарити датчиків.

Датчики струму перетворюють зміни регульованої величини в зміни струму через датчик.

Фотоелектричні датчики (фотодатчики) використовуються в автоматиці для перетворення в електричний сигнал різних неелектричних

величин: механічних зміщень; швидкості; розмірів деталей, що рухаються; температури; освітленості; прозорості рідкого або газового середовища і т.ін.

За принципом кодування інформації фотодатчики можна розподілити на дві групи: з амплітудною і з частотною модуляцією світлового потоку. У датчиків з амплітудною модуляцією значення фотоструму пропорційно світловому потокові, що залежить від керованої (контрольованої) неелектричної величини. У датчиків з частотною модуляцією фотострум змінюється дискретно за рахунок повного або часткового переривання світлового потоку від впливу неелектричної величини. Інформація про керовані (контрольовані) параметрі кодується в цих датчиках у вигляді числа, частоти або тривалості імпульсів фотоструму.

Фотодатчик складається з чутливого елементу (фотоелементу), джерела освітлення й оптичної системи. У деяких випадках фотодатчики використовують випромінювання об’єкта керування (контролю) і не містять джерела світла (датчики температури, освітленості та ін.). Деякі датчики з метою спрощення конструкції не мають оптичної системи. У більшості фотодатчиків перетворення вхідної неелектричної величини в електричний сигнал здійснюється в два етапи: спочатку відбувається її перетворення в зміну одного з параметрів світлового потоку, а потім ця зміна перетворюється фотоелементом в електричну величину (фотострум, спадання напруги, фото-ЕРС і т.д.). Усі фотодатчики по характеру формування впливу світлового потоку на фотоелемент можна розподілити на кілька видів:

– *фотодатчики*, у яких світловий потік змінюється за рахунок зміщення об’єкта керування (контролю) або зміни розмірів об’єкта (рис. 3.11). У датчиках випромінювання від джерела світла 1 оптична система 2 формує у рівнобіжний і рівномірний світловий потік **Ф**. У потоці міститься деталь 3,

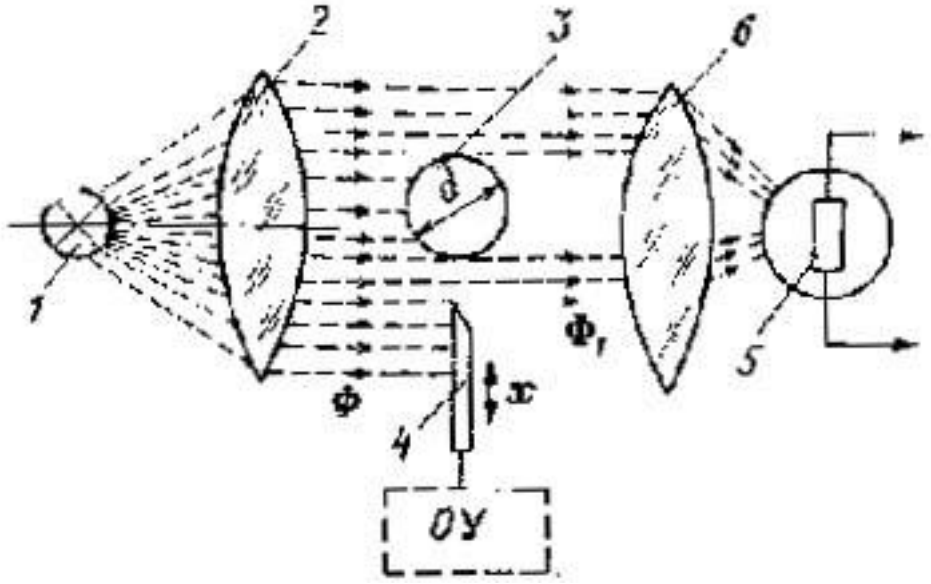


Рисунок 3.11 – Фотодатчик зі світловим потоком, що переривається ОУ

розміри якої потрібно контролювати, або заслінка 4, зв’язана механічно з ОУ , яка перекриває частину світлового потоку. За зміни розміру деталі **d** або зміщення заслінки ***x*** змінюється кількість світла (променистої енергії), що попадає на фотоелемент 5. Для підвищення чутливості світловий потік Φ_1, що містить інформацію про розміри деталі (або про зміщення об’єкту), збирається оптичною системою 6 і фокусується на світлочутливу поверхню фотоелементу. За таким принципіом працюють датчики фотоелектричних мікрометрів, датчики довжини, площіни, деформацій і т.д. На цьому принципі заснована робота і дискретних фотодатчиків, таких, як фотоелектричні датчики (перетворювачі) "кут-код", датчики частоти обертання, фотодатчики кінця магнітної стрічки, датчики розмірів петлі магнітної стрічки, що знаходиться в кишені стрічкопротягувального механізму , і т. д.;

– *фотодатчики*, у яких світловий потік попадає на фотоелемент після відбиття від об’єкту контролю (рис. 3.12, *а*). У цих фотодатчиках джерело світла 1 та оптична система 2 формують вузький світловий промінь, що після відображення від об’єкта 3 попадає через фокусуючу оптичну систему 4 на фотоелемент 5. Кількість відбитого світла, що попадає на

фотоелемент, залежить від відбивної здатності поверхні об’єкта (чистоти обробки, наявності пофарбованих ділянок і т.п.). Такі фотодатчики використовуються в читаючих автоматах, здатних автоматично зчитувати і кодувати інформацію з текстових і графічних документів, у вимірниках чистоти поверхні, фотоелектричних рефлектометрах, гігрометрах і ін.;

– *фотодатчики*, у яких світловий потік створюється об’єктом керування (контролю). Світловий потік, випромінюваний ОУ, містить інформацію про керований (контрольований) параметр об’єкта 1 (рис. 3.12,б). Оптична система 2 збирає і фокусує світловий потік на світлочутливу поверхню фотоелемента 3. Подібні фотодатчики використовуються у фотоелектричних вимірниках температури, дозиметрах променистої енергії, приладах для емісійного спектрального аналізу. Як чутливі елементи у фотодатчиках використовуються фотоелементи з зовнішнім, вентильним і внутрішнім фотоефектом.

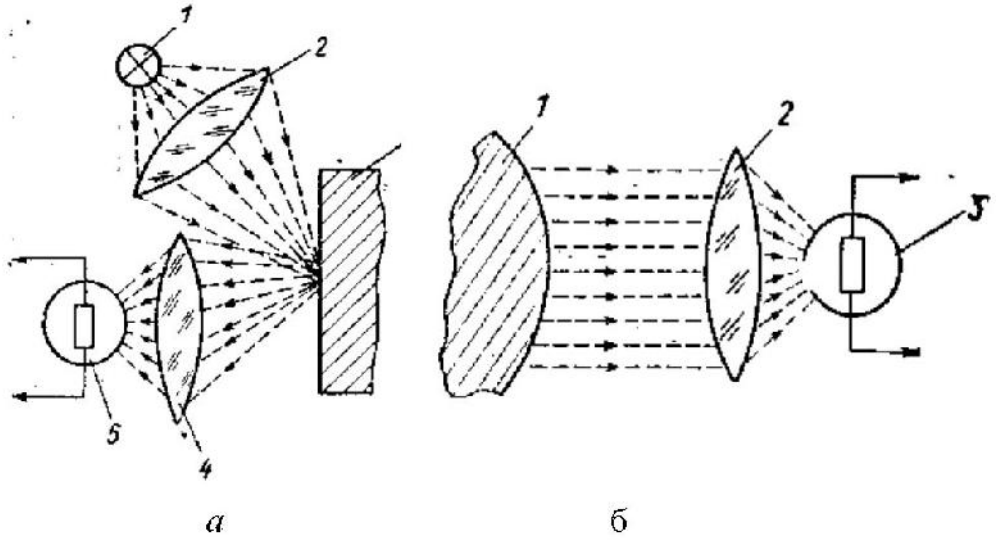


Рисунок 3.12 – Фотодатчик зі світловим потоком, відбитим від ОУ (*а*) і зі світловим потоком, випромінюваним ОУ (*б*)

Фотоелементи з зовнішнім фотоефектом (вакуумні і газонаповнювані) мають високу чутливість, лінійність світлової характеристики (залежність фотоструму від світлового потоку), високу

температурну стабільність характеристик. Однак вони мають і ряд істотних недоліків, що обмежують їхнє застосування у пристроях автоматичного керування і контролю: необхідність у підвищеній напрузі живлення (сотні і тисячі вольтів); крихкість скляного балона і можливість деформації електродів при механічних впливах; старіння і стомлюваність фотоелементів (зниження чутливості при сильній освітленості). Принцип роботи таких датчиків заснований на зміні провідності фотоелементів або на виникненні в них ЕРС під дією світлового потоку. У першому випадку фотоелемент здійснює перетворення світлового потоку у струм. Це явище називається *фотоефектом*. Фотоелемент із **зовнішнім** фотоефектом має скляну колбу (рис. 3.13, *а*), усередині якої розміщаються два електроди – катод К и анод А. Катодом є світлочутливий шар, нанесений на внутрішню поверхню

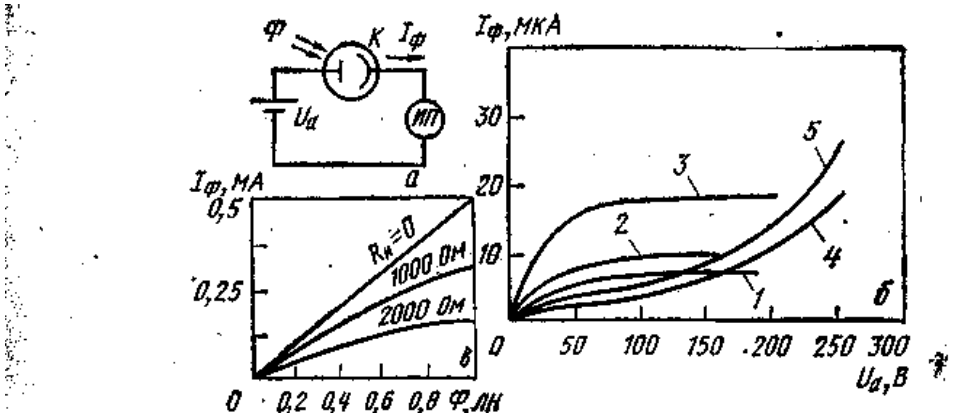


Рисунок 3.13 – Фотоелементи та їхні характеристики:
а - схема включення; *б* - вольтамперні характеристики; *в* - світлові характеристики

колби. Анодом служить електрод спеціальної форми (кільце, диск, стрижень), змонтований у середині колби і электрично ізольований від катода. До електродів фотоелемента підводиться напруга $\mathbf{U_a}$ від окремого джерела.

Якщо у середині колби створюється вакуум *(вакуумні фотоелементи)* світловим потоком з катоду вириваються електрони, що під впливом

електричного поля рухаються до анода. Величина фотоструму $\mathbf{I_ф}$ пропорційна світловому потокові Ф и виміряється приладом ИП.

В окремих випадках, навпроти, для посилення фотоструму в колбу вводиться невелика кількість інертного газу. Такі фотоелементи називаються *газонаповненими*. Внаслідок іонізації газу відбувається значне збільшення числа електронів, що попадають на анод, що призводить до відповідного збільшення струму в зовнішньому ланцюзі фотоелементу. Відношення величин струмів газонаповненого та вакуумного фотоелементів за тих самих умов висвітлення і при тій же анодній напрузі називається коефіцієнтом газового посилення. Однак можливість запалювання самостійного розряду є істотним недоліком газонаповненого фотоелемента.

Вольтамперні характеристики відображають залежність фотоструму від напруги на фотоелементі за постійної величини світлового потоку. На рис. 3.13,б наведені вольтамперні характеристики вакуумних фотоелементів (криві 1...3) та газонаповнених (криві 4, 5) які різко відрізняються від характеристик вакуумних фотоелементів. З цих кривих видно, що спочатку струм повільно змінюється зі збільшенням напруги, а потім швидко зростає за рахунок іонізації газу. Зі збільшенням освітленості криві зміщуються ліворуч й іонізація настає при меншому значенні анодної напруги.

Світлова характеристика фотоелементу виражає залежність фотоструму від величини світлового потоку за постійної анодної напруги, яка забезпечує режим насичення. Для вакуумних фотоелементів ці характеристики є прямими лініями, що проходять через початок координат (рис. 3.13, *в)*. Для газонаповнених фотоелементів пропорційна залежність фотоструму від світлового потоку справедлива при відносно слабкому світловому потоці.

Вентильні фотоелементи (фотодіоди і фототріоди) широко застосовуються у фотодатчиках різного типу. Вони *мають* лінійну світлову характеристику; високу чутливість; малу інерційність (частота переривання світлового потоку може бути до кількох кілогерців); малі габарити. У

залежності від схеми включення розрізняють вентильний і фотодіодний (фототріодний) режими роботи фотодіодів і фототріодів.

У *вентильному режимі фотодіод* є генератором фотоструму і не має потреби в джерелі живлення. У *фотодіодному* режимі до фотодіоду потрібно прикласти в зворотному замикаючому напрямку зовнішню напругу. У фототріодів у тріодному режимі в ланцюг бази подається напруга зсуву від зовнішнього джерела. Фотодіодний (фототріодний) режим включення фотодіодів (фототріодів) використовується в основному у фотодатчиках з дискретною світловою характеристикою (фотоелектричні перетворювачі "кут - код", читаючі автомати і т.д.).

Фоторезистори поряд з фотодіодами і фототріодами знаходять широке застосування, причому в основному у фотодатчиках з дискретною світловою характеристикою. *Перевагами фоторезисторів* є висока чутливість; стабільність параметрів; велика надійність і довговічність; можливість роботи як на постійному, так і на змінному струмі; малі габарити. Їхні *недоліки:* велика інерційність; сильний вплив навколишньої температури; нелінійність світлової характеристики; мала стабільність параметрів у фоторезисторів однієї партії.

Як джерела світлової енергії в деяких фотодатчиках використовується сам ОУ (при вимірі температури, освітленості і т.п.). Для більшості фотодатчиків є потреба в штучному джерелі світлового потоку. Найбільше поширення у фотодатчиках одержали прості в експлуатації лампи накалювання. З метою підвищення їхньої надійності і довговічності робочу напругу знижують на 20...30 % у порівнянні з номінальною. Для роботи в інфрачервоній області спектру застосовують спеціальні випромінювачі у виді штифтів з жароміцних напівпровідникових матеріалів. Менш поширені у фотодатчиках газорозрядні лампи. Вони мають високу світловіддачу і споживають при цьому в 2...3 рази менше енергії, ніж лампи накалювання. Однак номенклатура цих ламп обмежена, габарити їх більші, ніж ламп накалювання.

У цілому оцінюючи фотодатчики, слід зазначити їхню велику універсальність, відсутність зворотного впливу на об’єкт керування (контролю).

Тема 5. Класифікація та особливості підсилювачів систем автоматики.

Класифікація та особливості підсилювачів систем автоматики. У системах автоматики підсилювачі збільшують потужність вхідного сигналу, тому що сигнали датчиків, як правило, мають потужність недостатню, щоб пустити в хід виконавчий елемент. У деяких випадках одночасно з підсиленням вхідного сигналу в підсилювачі здійснюється також і якісне перетворення сигналу: постійний струм перетворюється в змінний, змінний у постійний і т.д.

Для роботи підсилювачів необхідне допоміжне джерело енергії. У залежності від виду енергії допоміжного джерела підсилювачі поділяються на електричні, гідравлічні, пневматичні і комбіновані.

Тема 6. Електричні підсилювачі.

Електричні підсилювачі. У залежності від фізичного принципу, покладеного в основу процесу підсилення, можуть бути електронними, іонними, магнітними, електромеханічними, діелектричними та ін. електронних підсилювачах використовуються електронні лампи, транзистори, тиристори і тиратрони. *Підсилювачі на електронних лампах і тиратронах* знаходять у даний час дуже обмежене застосування, тому що вони істотно поступаються за довговічністю, надійністю, ККД, габаритами, стабільностю до механічних впливів транзисторним і тиристорним підсилювачам.

Магнітні підсилювачі. Розглянемо дросель (рис. 4.1, *а*), у якому відбувається одночасне намагнічування постійним і змінним магнітними полями. Крива намагнічування матеріалу показана на рис. 4.1, б.

Нехтуючи активним опором обмотки **W~** і розсіюванням магнітного потоку, одержимо при синусоїдальній зміні напруги **U~** джерела змінного струму

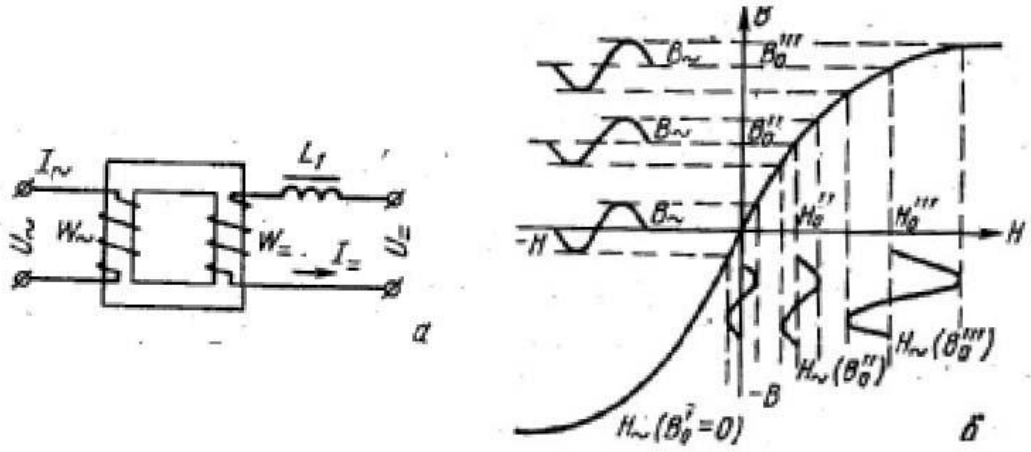


Рисунок 4.1– Схема дроселя і його характеристики

синусоїдальну зміну магнітної індукції **B~,** що накладається на постійну складову індукції **B_0.** У цьому випадку для різних значень **B_0** магнітної індукції можна побудувати криві зміни напруженості **H~** магнітного полю в дроселі. Величина **B_0** залежить від величини постійного струму підмагнічування **I_y**. В міру збільшення постійної складової магнітної індукції

режим роботи дроселя зміщується в область насичення; напруженість магнітного поля також зростає. За аналогічною кривою буде змінюватися і струм **I~** в обмотці дроселю **W~**. Таким чином, шляхом зміни струму підмагнічування і **B_0** можна керувати струмом **I~.** Це здійснюється за рахунок того, що при зростанні струму підмагнічування зменшується магнітна проникність **μ** унаслідок зміни відношення **B_0** до **H_0**. Зменшення **μ** призводить до зниження індуктивного опору **L** дроселя:

$$L = k_1 W^2 A \mu / l, \qquad (4.1)$$

де **A** – перетин сердечника дроселя; ***l*** – довжина магнітного ланцюга; **W** – число витків в обмотці змінного струму; k_1– коефіцієнт пропорційності.

Крива зміни струму ***I~*** у часі і відповідно напруженості полю **H~** утворюється при підмагнічуванні несиметричною, тобто вона містить другу і більш високі парні гармоніки. В обмотці **W═** підмагнічування дроселя ін-дукує, як і у вторинній обмотці трансформатора, значна напруга, у результаті чого змінний струм буде протікати через джерело постійної напруги. Для усунення цього явища вмикають індуктивність L_1. Обидва зазначені недоліки обмежують застосування простих дроселів і змушують досліджувати більш складні схеми.

Одна з таких схем, складена з двох розглянутих вище дроселів, наведена на рис. 4.2. Обмотка підмагнічування W_y виконана на середньому стрижні, у якому змінні потоки $Ф_1$~ і $Ф_2$~ спрямовані назустріч один одному і взаємно знищуються. Простота і надійність конструкції, можливість керувати змінним струмом великого розміру за допомогою слабкого постійного струму забезпечили широке застосування описаних дроселів, які називаються дроселями насичення, в автоматиці. Залежність струму **I~** у навантаженні від струму управління I_y при **U~=const** виражається симетричною кривою управління (рис. 4.2, б). За відсутності підмагнічування через опір навантаження протікає деякий початковий струм I_0 і, отже, є початкова потужність P_0.

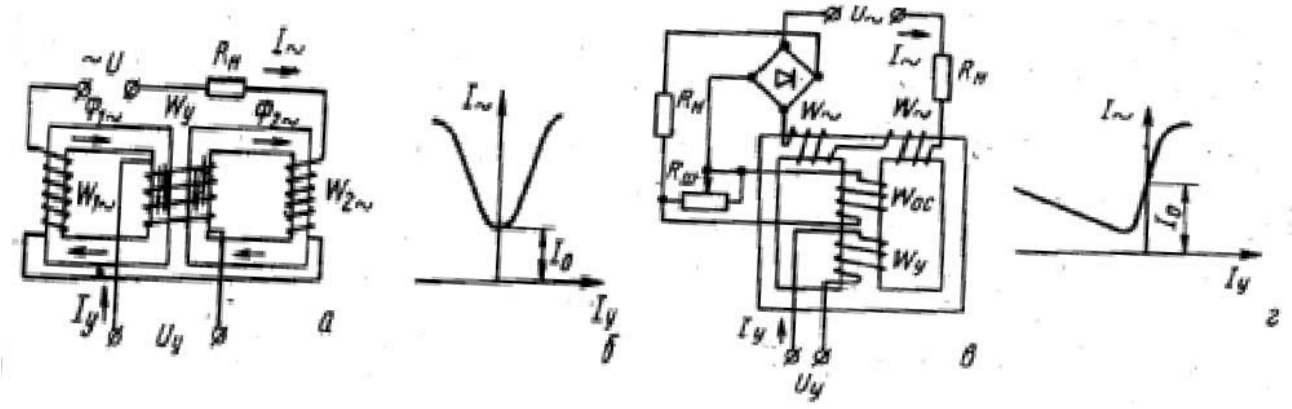


Рисунок 4.2 – Схеми магнітних підсилювачів із двома дроселями (*а*) , зворотним зв'язком (*в)* та їхні характеристики (б, *г)*

Сердечники магнітних підсилювачів виготовляються із феромагнітних сплавів і феритов. Магнітні підсилювачі працюють при частотах живлення 50 або 400…500 Гц, а також при частотах до 2 кГц. Постійна часу Т магнітних підсилювачів змінюється від сотих і десятих часток секунди для малопотужних підсилювачів до кількох секунд для могутніх підсилювачів.

Електромашинні підсилювачі (ЕМП) застосовуються в тих випадках, коли потрібно перетворити вхідний сигнал у постійний струм великої потужності. Звичайно такі підсилювачі використовуються для живлення виконавчих електродвигунів постійного струму, швидкість яких повинна регулюватися плавно. Найпростішим електромашинним підсилювачем є генератор постійного струму **Г**, що обертається з постійною швидкістю за допомогою допоміжного двигуна **Д1** (рис. 4.3, *а*). Вихідна напруга $\mathbf{U_{вих}}$ пропорційна потокові збудження. Подаючи вхідну напругу $\mathbf{U_{вх}}$ на обмотку збудження, можна керувати вихідною напругою генератора, змінюючи його величину і знак. Коефіцієнт підсилення визначається відношенням вихідної потужності генератора до потужності, що розсіюється на обмотці збудження, і може дорівнювати 20…100. Навантаженням генератора, як уже вказувалося, є ланцюг якорю виконавчого двигуна **Д2**. Залежність вихідної напруги генератора від керуючої напруги лінійна в початковій частині характеристики, яка досягає насичення при великому значенні струму управління. Поряд

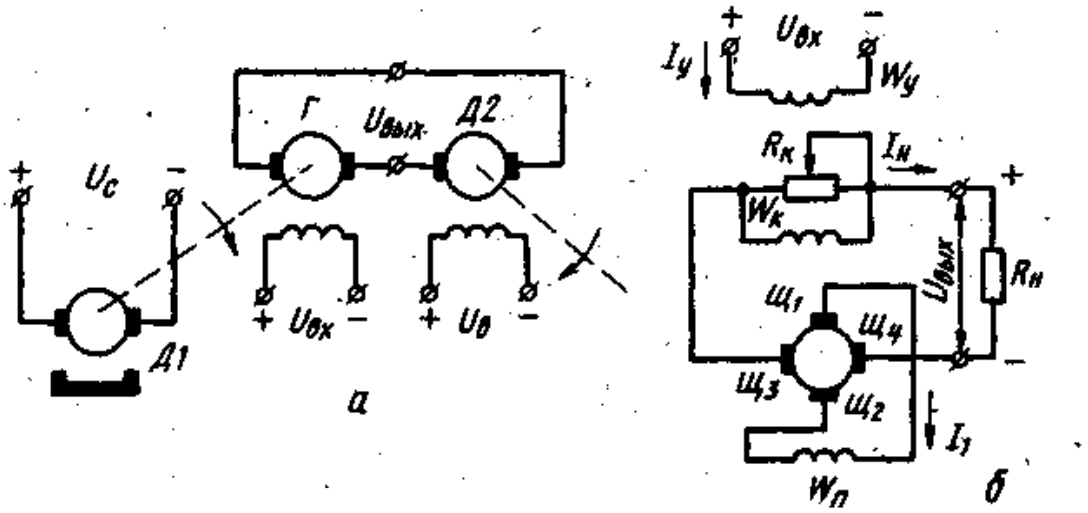


Рисунок 4.3 – Схеми електромашинних підсилювачів

простими електромашинними підсилювачами застосовуються також більш досконалі підсилювачі з поперечним полем (рис. 4.3, б). Якір такого підсилювача містить дві пари щіток, розташованих перпендикулярно одна до іншої. На статорі розташовуються обмотка управління $\mathbf{W_у}$, компенсаційна обмотка $\mathbf{W_к}$, обмотка підмагнічування $\mathbf{W_п}$ і обмотка додаткових полюсів. Якщо подати на обмотку управління струм $\mathbf{I_у}$, створюваний напругою $\mathbf{U_{вх}}$, то за подовжньою віссю підсилювача утвориться потік $\mathbf{Ф_у}$. У поперечному ланцюзі якоря під дією цього потоку наводиться ЕРС поперечного ланцюга $\mathbf{E_1}$. Поперечна пара щіток $\mathbf{Щ_1}$ і $\mathbf{Щ_2}$ замкнена на малий опір обмотки підмагнічування: тому навіть невелика $\mathbf{E_1}$ викликає в поперечному ланцюзі значний струм $\mathbf{I_1}$. Цей струм, протікаючи по якорі, створює поперечний магнітний потік $\mathbf{Ф_1}$, завдяки якому в подовжньому ланцюзі якоря наводиться $\mathbf{E_2}$, що знімається з щіток подовжнього ланцюга $\mathbf{Щ_3}$ і $\mathbf{Щ_4}$ на навантаженні $\mathbf{R_н}$.

Ефект посилення зв’язаний з тим, що поперечний потік $\mathbf{Ф_1}$ виявляється значно більшим, а ніж його вихідний подовжній потік $\mathbf{Ф_у}$. Якщо до щіток

по-вздовжнього ланцюга підключено навантаження, то по провідниках якоря проходить струм навантаження $\mathbf{I_н}$. Вихідна напруга $\mathbf{U_{вих} = E_2 – I_H R_i}$, де $\mathbf{R_i}$ – внутрішній опір ЕМП. Потік реакції якоря $\mathbf{Ф_2}$, створюваний навантажуваль-ним струмом, діє назустріч потокові управління $\mathbf{Ф_у}$, компенсуючи його дію. Тому у всіх ЕМП з поперечним полем, крім керуючої обмотки, передбачена так називана компенсаційна обмотка $\mathbf{W_к}$, що виконується з товстого проводу і вмикається в ланцюг навантаження таким чином, щоб її потік $\mathbf{Ф_к}$ міг компенсувати дію потоку $\mathbf{Ф_2}$. Напрямок потоку $\mathbf{Ф_к}$ збігається з напрямком потоку $\mathbf{Ф_у}$. На холостому ході $\mathbf{(I_н = 0)}$ $\mathbf{E_2}$ і $\mathbf{U_{вих}}$ прямо пропорційні керуючому струмові $\mathbf{I_у}$, а, отже, і вхідній напрузі $\mathbf{U_{вх}}$: $\mathbf{U_{вих} = kU_{вх}}$ (тут $\mathbf{k}$– коефіцієнт підсилення ЕМП). При наявності струму навантаження $\mathbf{E_2}$ може збільшуватися чи зменшуватися в порівнянні з ЕРС холостого ходу в залежності від співвідношення між потоками $\mathbf{Ф_2}$ і $\mathbf{Ф_к}$. При $\mathbf{|Ф_к| = | Ф_2|}$ підсилювач повністю скомпенсований і його ЕРС не залежить від струму навантаження. Найбільш доцільне застосування ЕМП з невеликою недокомпенсацією. Необхідний ступінь компенсації підбирається шляхом шунтування компенсаційної обмотки резистором з регульованим опором $\mathbf{R_к}$. Залежність вихідної напруги від вхідної в цьому випадку линійна на робочій ділянці, потім при більших значеннях керуючого струму характеристика досягає насичення і має гистерезис, як і характеристика простого ЕМП. Для зменшення гистерезису іноді на основне магнітне поле накладають додаткове змінне поле з невеликою амплітудою.

Електромашинний підсилювач з поперечним полем складається як би з двох каскадів: у першому здійснюється перехід від слабкого потоку управління до більш сильного потоку поперечного ланцюга, у другому – поперечний потік перетворюється у вихідну напругу і струм. Тому коефіцієнт підсилення ЕМП досягає кількох тисяч. Часто ЕМП і допоміжний двигун виконуються в одному агрегаті, що дозволяє зменшити масу і

габаритні розміри. У режимі повної компенсації електромашинний підсилювач як динамічна ланка може бути представлений у вигляді ланцюжка послідовно з'єднаних інерційних ланок.

Електромагнітні реле перетворюють електричний сигнал у зміщення якоря електромагніту, що викликає замикання чи розмикання контактів. Електромагнітні реле можна розглядати як один з видів електричних підсилювачів, тому що потужність сигналу, необхідна для спрацьовування реле, може бути істотно меншою потужності електричного ланцюга, яким керують контакти реле. Електромагнітні реле можуть бути постійного і змінного струму. *Електромагнітне нейтральне реле постійного струму* працює незалежно від напрямку (полярності) струму в обмотці.

У *реле із поворотним якорем* (рис. 4.4, *а*) у вимкненому стані під дією пружини 1 якір 2 займає верхнє положення. При цьому середній контакт 3, зв'язаний з якорем реле, замкнений з контактом 4. Контакт 5 у цьому положенні розімкнений (замикаючий контакт). Якщо подати струм в обмотку 6, то виникне магнітний потік **Ф**, що замикається по сердечнику (магнитопроводу) 7, якореві 2 і повітряному зазорові **δ**. Магнітний потік намагнічує якір, при

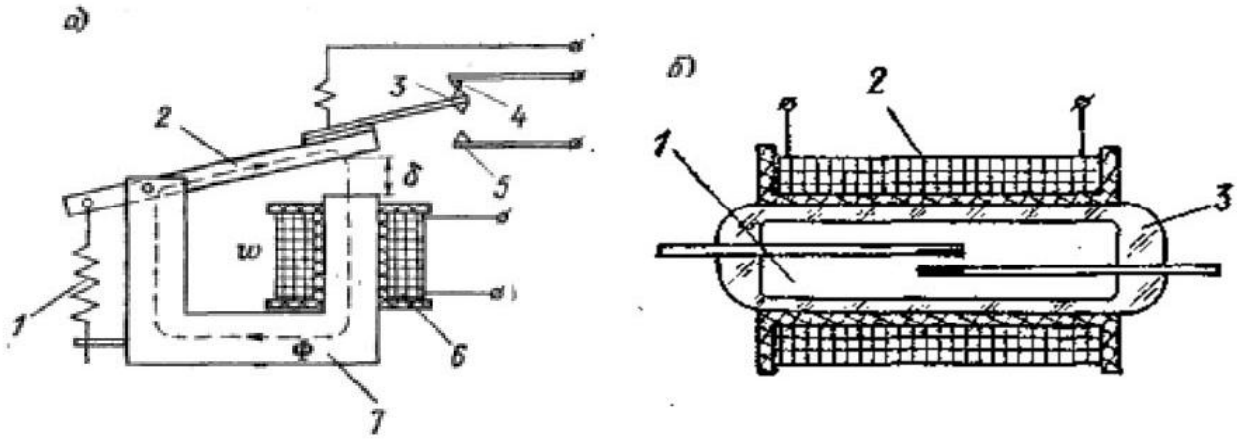


Рисунок 4.4 – Електромагнітні нейтральні реле: *а* - із поворотним якорем; б - з герметизированным контактом (геркон)

цьому виникає електромагнітна сила, пропорційна квадратові ампер-витків обмотки.Під дією електромагнітної сили якір повертається і перемикає контакти. Цей етап роботи реле називається спрацьовуванням. При вимиканні струму електромагнітна сила зникає і під дією поворотної пружини якір повернеться у вхідне положення. Цей етап роботи реле називається відпусканням. Контакти реле закріплюють звичайно на плоских пружинах (контактні пружини). Це забезпечує пружне зіткнення контактів при спрацьовуванні і необхідний контактний тиск.

Реле з герконом (рис. 4.4, б) має просту конструкцію: геркон 1 розміщується усередині котушки 2 (обмотки) реле. Геркон являє собою мініатюрну скляну трубку 3 (балон) з впаяними усередині неї двома контактними пружинами з магнітом‘якого феромагнітного матеріалу (пермалою). Контактні пружини одночасно виконують функції якоря, сердечника (магнитопровода), контактів і поворотної пружини. Кінці пружин покривають тонким шаром срібла, золота чи родію для забезпечення надійного контакту при зіткненні пружин. Усередині балона геркона створюється або вакуум, або цей простір заповнюється інертним газом (азот, аргон). При подачі струму в обмотку реле виникає магнітний потік, що намагнічує контактні пружини геркона. Між ними виникає електромагнітна сила і контакти замикаються. Реле з герконом відрізняються підвищеною надійністю, довговічністю і більшою швидкодією, ніж реле з поворотним і втяжним якорем.

Недоліки : невелика потужність, яку можуть керувати контакти геркона; вплив зовнішнього магнітного полю, здатного викликати помилкове спрацьовування геркона.

Геркони можуть застосовуватися самостійно в кінцевих вимикачах, дискретних датчиках положення, кнопкових і клавішних вимикачах у пультах управління ЦОМ і т.д. Управління замиканням герконів у цьому випадку здійснюється від невеликого постійного магніту, що закріплюється

на рухомій частині конструкції кнопки, вимикача і т.п. При наближенні постійного магніту до геркону на певну відстань контактні пружини геркона намагнічуються і, взаємно притягаючись під дією електромагнітної сили, замикають керований електричний ланцюг.

Поляризовані реле на відміну від нейтральних реагують не тільки на значення, але і на напрямок (полярність) струму в обмотці. Поляризація реле здійснюється від постійного магніту. При одній полярності струму в обмотці якір реле перемикається в нове стійке положення, при іншій – залишається нерухомим. При вимиканні струму в обмотці якір залишається в тім становищі, що він займав у момент вимикання струму (якір "запам’ятовує" стан, що відповідає моментові вимикання струму).

Феріди (спеціальні електромагнітні реле постійного струму) складаються (рис. 4.5, *а*) із сердечника 1, виготовленого з фериту з прямокутною петлею гистерезису, і контактних пружин 2, виготовлених з магнітом‘якого феромагнітного матеріалу (пермалою). Кінці контактних пружин покривають тонким шаром срібла чи золота, і вони виконують, як і у герконі, функції контактів. На сердечнику феріду розташовується керуюча обмотка 3. Розглянемо роботу феріду, вважаючи, що у вихідному стані струм в обмотці не протікає, контакти розімкнені і індукція в сердечнику має мінімальне

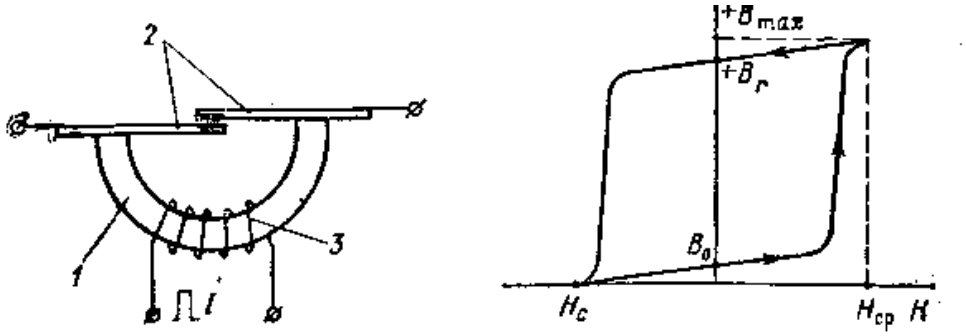


Рисунок 4.5- Устрій феріду і крива намагнічування матеріалу його сердечника

значення $\mathbf{B_0}$. При подачі на обмотку імпульсу струму ***i*** певної полярності і амплітуди виникає магнітне поле з напруженістю $\mathbf{H_{ср}}$ і індукція у сердечнику досягає значення індукції насичення + $\mathbf{B_{max}}$. Контактні пружини намагнічуються, між ними виникає електромагнітна сила взаємного притяжіння і контакти вімкнуться. Після закінчення імпульсу струму сердечник зберігає намагнічений стан із залишковою індукцією + $\mathbf{B_r}$, контакти феріду залишаються в замкненому стані. Для розмикання контактів в обмотку феріду необхідно подати імпульс струму протилежної полярності, щоб розмагнітити магнітну систему. Залишкова індукція у сердечнику знову стає рівною $\mathbf{B_0}$, і контактні пружини за рахунок сил пружності розімкнуть контакти. Амплітуда імпульсу струму, що вимикає, не повинна створювати напруженість, що перевищує коэрцитивную силу $\mathbf{H_c}$, тому що в противному випадку можливе повторне вмикання феріду від магнітного потоку протилежного напрямку.

Перевагою ферідів є висока економічність, тому що енергія ними споживається лише в момент переключення.

Для управління великими струмами застосовують спеціальні електромагнітні реле, контакти яких розраховані на переключення струмів у десятки і сотні амперів. Такі реле дістали назву контакторів. Контактори можуть бути як постійного, так і змінного струму.

Для управління трифазними електродвигунами застосовують **контактори** змінного струму, що дістали назву магнітних пускачів (рис. 4.6). Вмикання магнітного пускача здійснюється кнопкою $\mathbf{S_1}$ "Пуск". При цьому спрацьовує контактор $\mathbf{K_1}$ і подає через свої головні (могутні) контакти **K1.1, K1.2, K1.3** напругу на електродвигун **M1**. Одночасно відбувається також замикання допоміжного контакту **K1.4**, що блокує подальшу роботу кнопки **S1**. Керуюча дія кнопки **S1** втрачається, тому що струм на обмотку контактора **K1** подається тепер через власний контакт **K1.4.** Така схема вмикання називається самобло-

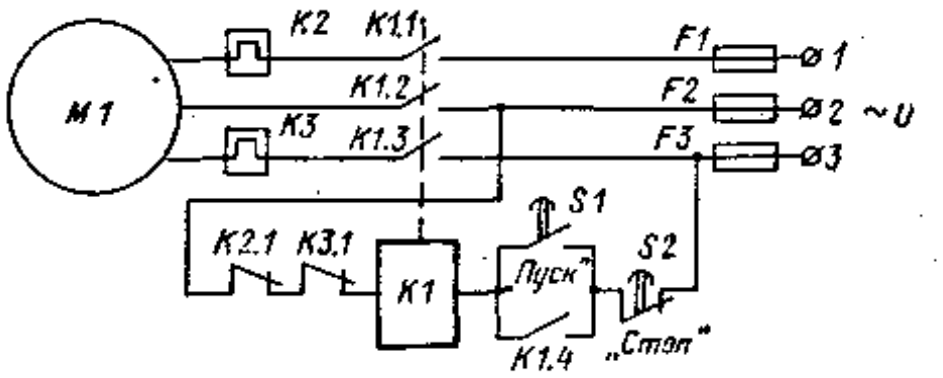


Рисунок 4.6 – Принципова схема магнітного пускача

куванням. Для захисту електродвигуна від тривалого перевантаження в ланцюг 1-ї і 3-ї фаз включені біметалічні теплові реле **К2** і **К3**. Ці реле мають контакти **К2.1** і **К3.1**, включені послідовно з обмоткою контактора **К1**. За тривалого перевантаження, коли двигун споживає струм, значно більший припустимого, одне з теплових реле (чи обоє одночасно) розмикає ланцюг живлення обмотки контактора **К1** і він вимикається. Його контакти **К1.1** ... **К1.4** розмикаються, і двигун зупиняється. Точно так само відбувається вимикання магнітного пускача, якщо напруга в мережі відключиться чи знизиться до 65 % номінального. Повторне вмикання магнітного пускача можна здійснити лише кнопкою **S1** "Пуск", тобто мимовільне вмикання магнітного пускача після відновлення напруги в мережі відбутися не може. Відключення магнітного пускача здійснюється кнопкою **S2** "Стоп". Для захисту електродвигуна від короткого замикання в схему магнітного пускача включені плавкі запобіжники **F1, F2, F3**.

При виборі реле для конкретного устрою автоматики і при порівнянні реле різних типів користуються параметрами, що характеризують властивості реле:

– струм спрацьовування $\mathbf{I_{ср}}$ (потужність спрацьовування $\mathbf{P_{ср}}$), тобто струм (чи потужність), який потрібно подати на обмотку реле для його надійного спрацьовування;

– струм відпускання $\mathbf{I_{вп}}$ (потужність відпускання $\mathbf{P_{вп}}$), тобто струм (чи потужність) у ланцюзі обмотки, при якому реле вимикається (відпускає);

– параметр електричного ланцюга (струм, напруга), яким керують контакти реле;

– час спрацьовування реле (інтервал часу від моменту подачі струму в обмотку реле до початку впливу контактів на керований ланцюг);

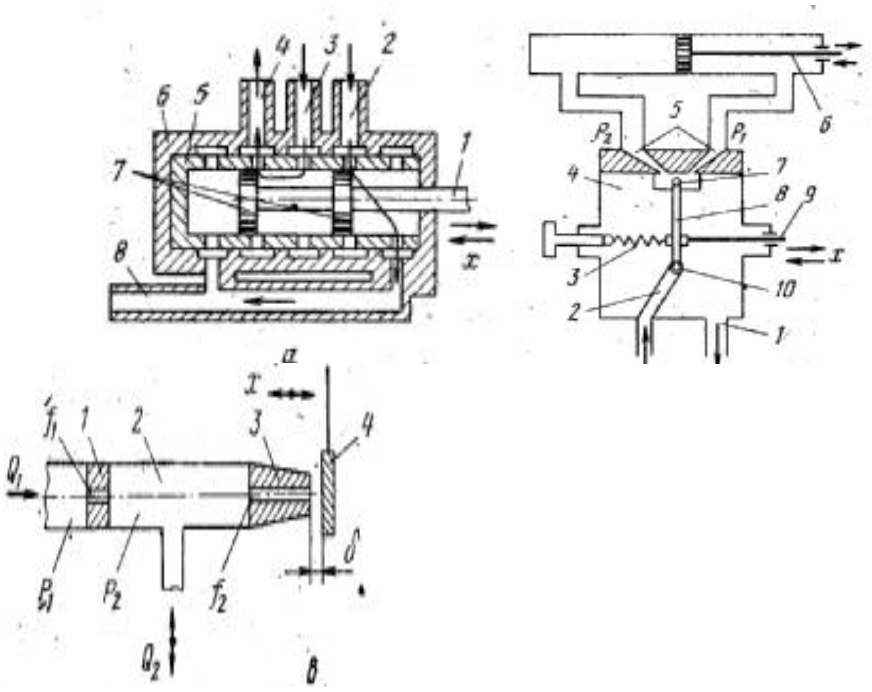
– довговічність (гарантоване число спрацьовувань реле при номінальному навантаженні в ланцюзі контактів).

Тема 7. Гідравлічні і пневматичні підсилювачі.

Гідравлічні і пневматичні підсилювачі. Для збільшення потужності в гідравлічних і пневматичних устроях автоматики застосовуються підсилювачі на золотникових, струмінних і дросельних елементах, а також з використанням мембранних устроїв із жорстким центром.

Схема ***золотникового*** підсилювача без виконавчого устрою представлена на рис. 4.7, *а*. Підсилювач складається зі штока 1 з буртиками 7, гільзи 5 і корпуса 6. Шток (золотник) зв’язаний з чутливим елементом, зміщення якого $\boldsymbol{x}$. Робочим середовищем є олія, вода чи повітря, що від насоса через трубку 3 підводяться у внутрішню порожнину гільзи.

У нейтральному положенні буртики 7 закривають вікна каналів 2 і 4, що з’єднують порожнини золотника з виконавчим механізмом. При зміщенні плунжера ліворуч робоче середовище з трубки 3 по каналу 4 потрапляє у вико- навчий механізм. Через інші отвори від виконавчого механізму робоче середовище надходить у зливальну трубу 8. При зміщенні плунжера праворуч



б

Рисунок 4.7 – Схеми гідравлічних і пневматичних підсилювачів

виконавчий механізм рухається у зворотний бік.

Вхідна потужність золотникових підсилювачів, що витрачається на рух плунжера, звичайно складає кілька Вт, тоді як на виході виконавчого механізму, підбираючи площину відкриття золотника і тиск у напірній трубі, можна дістати потужність до 100 кВт. Коефіцієнт підсилення за потужностю золотникових підсилювачів у ряді випадків досягає значень порядку $10^4 \ldots 10^5$.

Підсилювачи *зі* ***струмінними трубками*** засновані на перетворенні енергії рідини, що рухається, в енергію тиску. Підсилювач працює у такий спосіб (рис. 4.7, б). У корпусі підсилювача 4 розташовується струмінна трубка 8 з конічною насадкою 7. Корпус має вхідний 2 і вихідний 1 канали. Трубка може повертатися навколо осі 10, перпендикулярної площини рисунка. Зсув трубки провадиться штовхальником 9, з'єднаним з чутливим елементом. За допомогою пружини 3 встановлюється первісне положення

струмінної трубки; при цьому струмінь рідкої олії, випливаючи з наконечнику трубки, потрапляє в обидва канали 5. При відхиленні трубки із середнього положення тиск p_1 в одному з каналів зростає, а тиск p_2 в іншому падає. Під дією різниці тисків виконавчий механізм 6 зміщується в той чи інший бік. Коефіцієнт підсилення підсилювача зі струмінною трубкою досягає 10^4.

Статичні характеристики розглянутих підсилювачів обумовлюють залежність зміни чи витрати тиску в прийомних каналах від зсуву керованого елементу (плунжера, золотника чи струмінної трубки). Як правило, ці характеристики нелінійні.

Підсилювач з елементом типу ***"сопло-заслінка"*** (рис. 4.7, *в)* складається з дроселя 1 з постійним прохідним перетином f_1, міждросельної камери 2, сопла 3 перетином f_2 і заслінки 4, що разом представляють собою дросель із змінним прохідним перетином. Робоче середовище підводиться в підсилювач за постійним тиском p_1. Воно тече через дросель, міждросельну камеру, сопло, а потім через зазор δ проміж торцем сопла і заслінкою. Міждросельна камера з'єднується з робочою камерою виконавчого механізму. Заслінка зміщується чутливим елементом. Положення заслінки регулює витрати робочого середовища через сопло, а отже, і через дросель 1, тому тиск p_2 і витрати Q_2 у камері змінюються. Витрачаючи невелику потужність на управління заслінкою, на виході підсилювача одержуємо значну потужність $P = p_2Q_2$.

Мембранні підсилювачі тиску з постійними коефіцієнтами підсилення мають дві мембрани з жорсткими центрами (рис.4.8, *а*). За умови рівноваги

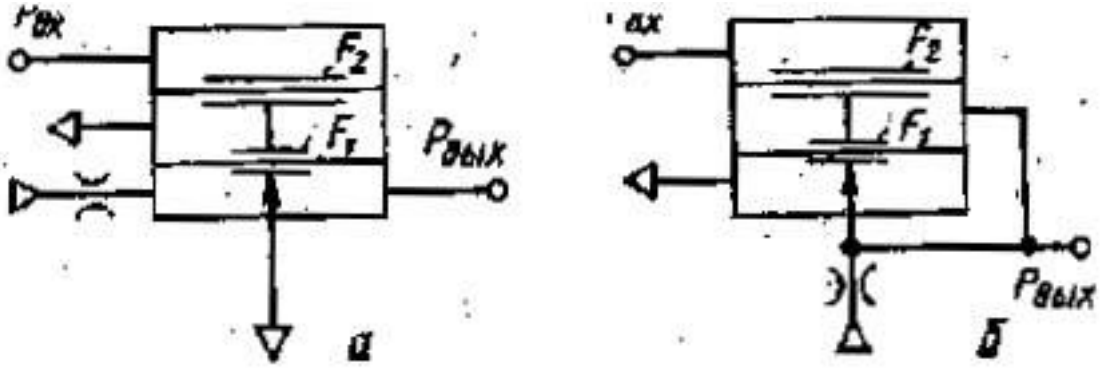


Рис. 4.8 – Схеми мембранних підсилювачів:

а - з будь-яким коефіцієнтом підсилення; б - з коефіцієнтом більшим за одиницю

навантаження $p_{вх} F_2 = p_{вих} F_1$, або $p_{вих} = k\, p_{вх}$, де $p_{вх}$, $p_{вих}$ – тиски на вході і виході відповідно; F_1, F_2 – площіни мембран; $k = F_2/F_1$ – коефіцієнт підсилення.