Змістовий модуль 4 – Виконавчі елементи систем автоматики

Тема 12. Класифікація і загальна характеристика виконавчих елементів.

Виконавчі елементи (ВЕ) систем автоматики (іноді їх називають також сервомоторами або сервоприводами) призначені для створення керуючого впливу на регульовальний орган (РО) об’єкта управління (ОУ). При цьому змінюється положення або стан РО, що призводить в остаточному підсумку до зміни положення або стану ОУ відповідно до алгоритму управління.

У залежності від керуючого впливу на виході ВЕ поділяються на силові і параметричні. Зміна просторового положення РО можлива у тому випадку, коли ВЕ створює керуючий вплив у вигляді сили або моменту. Такі ВЕ одержали назву силових. До них відносяться електромагніти, електромеханічні муфти, різні види двигунів.

Устрій, що містить двигун, редуктор і елементи управління двигуном (підсилювач, реле, контактор, золотниковий розподільник і т. п.), називають силовим приводом, або просто приводом. У залежності від виду енергії, що живить двигун, розрізняють електро-, пневмо- і гідропривод. Знаходять застосування і комбіновані приводи: електрогідравличні, електропневматичні і пневмогідравличні.

Ще одним різновидом є спостережний привод, що відтворює на виході задане на вході зміщення, але з великим механічним посиленням, тобто момент або сила на виході його істотно більша, а ніж на вході. Привод, що стежить, широко застосовується в автоматичних маніпуляторах (роботах), для управління прокатними станами, антенами радіолокаторів, у космічній і ракетній техніці і т.д. Формально цей привод відноситься не до елементів автоматики, а до устроїв, тому що в ньому поєднуються кілька елементів. Але в складних (комплексних) САУ привод може розглядатися як один функціональний елемент – виконавчий.

Виконавчі елементи, що змінюють стан РО, називаються параметричними. Наприклад, в автоматичному керуючому пристрої

термостата ВЕ є підсилювач, навантаженням якого служить нагрівальний елемент термостату. При відхиленні температури від запропонованого значення змінюється вхідна напруга підсилювача; при цьому змінюється і вихідна напруга, а, отже, і струм у нагрівальному елементі і температура у термостаті. У цьому пристрої підсилювач об‘єднує в собі функції підсилювача і ВЕ. Він створює керуючий вплив (напругу, струм), що змінює температуру нагріваючого елементу, тобто параметр РО. Таке використання підсилювачів досить часто зустрічається в пристроях автоматики. Підсилювачі одночасно є основним видом параметричних ВЕ .

Особливо часто в якості параметричних ВЕ використовуються електромагнітні реле, контактори, тиристорні і транзисторні реле. Докладно підсилювальні релейні елементи були розглянуті у гл. 4, тому далі познайомимося лише із силовими ВЕ. У залежності від характеру руху вихідного вала ВЕ їх можна розподілити на три види: з лінійним, поворотним (кут повороту менше 360°) і з обертальним рухом (кут повороту більше 360°).

До силових ВЕ пред’являється ряд вимог, що обумовлені конструкцією й алгоритмом роботи ОУ, умовами експлуатації і т.п.:

– максимальна сила або момент, що розвивається ВЕ , повинні бути свідомо більшими, а ніж максимальна сила або момент, необхідні для зміщення РО об’єкта управління у всіх режимах роботи;

– висока швидкодія;

– максимальне значення ККД;

– характеристика ВЕ повинна бути близька до лінійної, якщо в процесі роботи керуючий вплив, створюваний ВЕ, повинен плавно регулюватися;

– потужність, необхідна для управління ВЕ , має бути невеликою;

– висока надійність і довговічність;

– невеликі розміри і маса.

Тема 13. Електромагнітні виконавчі елементи.

Електромагнітні виконавчі елементи є найбільш простими, надійними і швидкодіючими із силових електричних ВЕ. Вони знаходять широке застосування для управління стопорними (фіксуючими) пристроями, для зміщення регулювальних органів на невелику відстань (заслінок, золотників, вентилів, захватів в автоматичних маніпуляторах) і т.п. Далі для стислості будемо називати їх просто "електромагніти". У залежності від роду струму електромагніти поділяються на електромагніти постійного струму і електромагніти змінного струму.

За характером руху якоря електромагніти поділяються на електромагніти з лінійним (поступальним) і з поворотним рухом. Електромагніти можуть забезпечуватися додатковими контактами, що замикаються в момент спрацьовування. Додаткові контакти використовують для сигналізації і зменшення струму в обмотці електромагніту після спрацьовування (за тривалого вмикання обмотки).

На рис. 6.1 наведена конструкція нормальнозамкненого електромагнітного вентиля (клапана), що широко застосовується в пневмо- і гідросистемах для управління потоком робочого середовища – рідини або газу. При подачі керуючого сигналу (струму) в обмотку 1 якір електромагніта 2 втягується усередину котушки, стискаючи пружину 3. Зв’язаний з якорем вихідний вал (шток) 4 зміщує нагору клапан 5, відкриваючи отвір між камерами 6 і 7. При вимиканні струму під дією пружини якір виштовхується з котушки і клапан закривається. Цей виконавчий електромагнітний механізм працює в релейному режимі (відкрито-закрито).

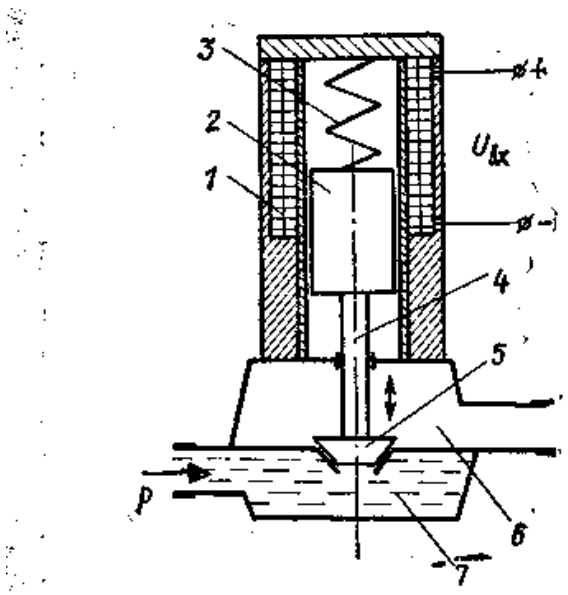


Рисунок 6.1– Електромагнітний вентиль

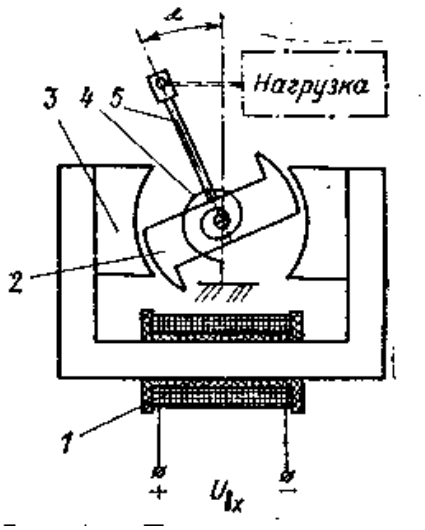


Рисунок 6.2– Поворотний електромагніт

На рис. 6.2 показана конструкція нейтрального електромагніту із поворотним якорем. При подачі струму в обмотку 1 якір 2 повертається під дією електромагнітного зусилля, що притягає якір до полюсних наконечників 3. Поворотом якоря закручується спіральна пружина 4 і виникає протидіючий момент, пропорційний кутові повороту **α**. Якщо обертаючий і протидіючий мо-

менти будуть рівні, поворот якоря припиниться. Таким чином, поворот якоря і зв'язаного з ним вихідного важеля 5 пропорційний значенню магнітного потоку, створюваного обмоткою, і, отже, вхідному сигналові – струму в обмотці. Характеристика такого електромагніту $\alpha = f(I_{вх})$ залежить від профілю якоря або полюсних наконечників.

В устроях автоматики знаходять застосування і поляризовані силові електромагніти, що мають лінійну і реверсивну характеристику. Поляризація здійснюється за допомогою постійного магніту. Подібні виконавчі

механізми застосовуються для управління положенням золотників, як силові компенсатори деяких приборів і т.ін.

Недоліками, властивими всім електромагнітним виконавчим механізмам, є обмежене і порівняно невелике значення зусилля або моменту, що розвива**ється, а також невелика потужність (від одиниць до кількох сотень Вт).**

Електромеханічні муфти служать для передачі руху від одного вала до іншого за сигналами управління, тобто їх можна розглядати як дистанційно керовані вимикачі механічного руху. За допомогою електромеханічних муфт можна здійснити швидке з'єднання або роз'єднання і гальмування елементів конструкції електроприводу або об'єкту управління. Деякі види муфт дозволяють плавно регулювати частоту обертання і момент, переданий на ведений вал. Муфти конструюють так, щоб у випадку різкого збільшення навантаження відбувалося прослизання між ведучим і веденим елементами конструкції муфти. Це захищає двигун від змушеної зупинки у включеному стані (що звичайно призводить до аварії двигуна).

У залежності від характеру зв'язку між ведучим і веденим елементами конструкції електромеханічні муфти поділяються на муфти з механічним зв'язком і муфти зі зв'язком через магнітне поле. У муфтах з механічним зв'язком обертаючий момент від ведучого валу до веденого передається за рахунок тертя – сухого або грузлого.

Електромеханічна муфта сухого тертя (фрикційна) показана на рис. 6.3. Двигун приводу 1 безупинно обертає ведучий вал з диском 2. При вимкненому стані рух на ведений диск 3 не передається, тому що якір електромагніта 5 за рахунок пружини 4 перебуває у правому положенні і між

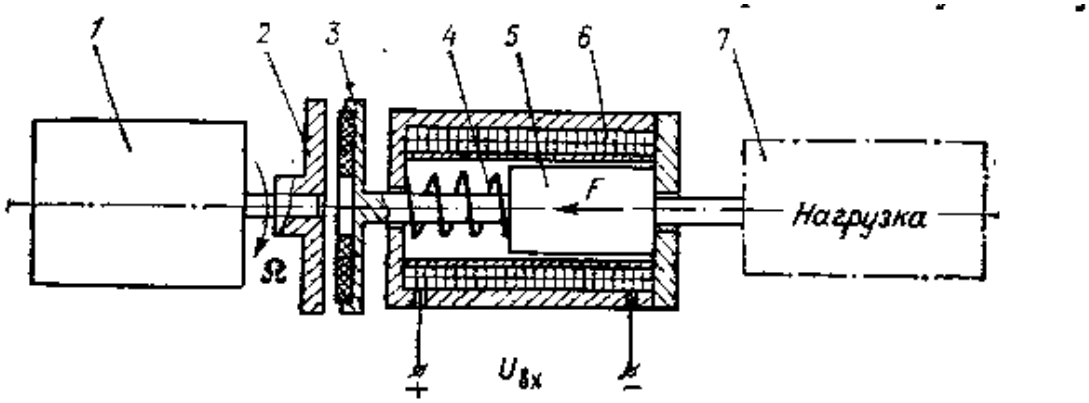


Рисунок 6.3 – Фрикційна муфта із сухим тертям

дисками 2 та 3 існує повітряний проміжок – зазор. При вмиканні муфти струм, що протікає по обмотці електромагніту 6, створює магнітне поле і електромагнітну силу **F**, що втягує якір усередину обмотки. Ведений диск із валом притискується до ведучого диска і починає обертатися, передаючи рух на об’єкт управління 7. Обертаючий момент, переданий такою муфтою, залежить від коефіцієнта тертя між ведучим і веденим дисками:

$$T = f\ F\ D,$$

де f – коефіцієнт тертя, що залежить від матеріалу дисків, стану їхньої поверхні і змащення; D – діаметр веденого диску.

На рис. 6.4 показана **фрикційна муфта з грузлим тертям** (феропорошкова муфта). Простір між напівмуфтами 1 і 2 заповнено феромагнітним середовищем 3, що складається, наприклад, із суміші порошку карбонільного або кременистого заліза і речовини, що змащує (тальк, графіт, олія), і це поліпшує прослизання напівмуфт при холостому ході та зменшенню

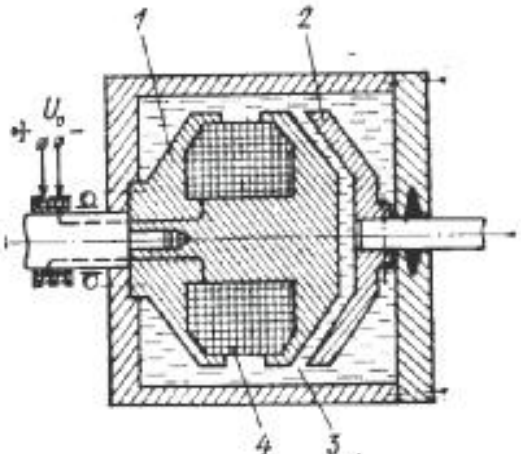


Рисунок 6.4 – Феропорошковая муфта

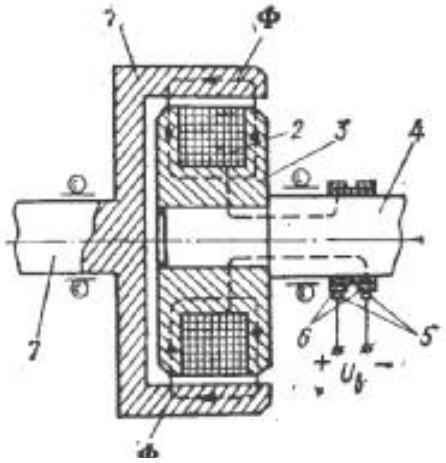


Рисунок 6.5 – Асинхронна муфта

зносу ферропорошку.

При подачі струму в обмотку 4 ведучої напівмуфти 1 виникає магнітне поле, яке намагнічує окремі часточки заліза, що злипаються між собою, і в’язкість феромагнітного середовища 3 збільшується. Ведена напівмуфта 2 починає обертатися, передаючи рух на об’єкт управління. В міру збільшення струму в обмотці 4 збільшуються в’язкість феромагнітного середовища (середовище "твердішає") і значення моменту, що передається на ведений диск і вал. Таким чином, фрикційні муфти з грузлим тертям є керованими, що дозволяє плавно регулювати переданий обертаючий момент, а, отже, і частоту обертання веденого вала.

Перевагами фрикційних муфт із грузлим тертям у порівнянні з муфтами сухого тертя є велика швидкодія, ККД, термін служби, а також можливість плавного регулювання переданого моменту. *Недоліками* – складність конструкції, витік феромагнітного середовища через ущільнення, необхідність періодичної зміни феромагнітного наповнювача (у середньому через 400…500 годин роботи) через поступове окислювання і руйнування зерен ферропорошку.

До муфт зі зв’язком через магнітне поле відносяться гістерезисні і індукційні (асинхронні і синхронні). Ці муфти мають високу надійність,

довговічність, швидкодію, а також можливість плавно регулювати переданий обертаючий момент.

На рис. 6.5 зображена конструкція ***асинхронної муфти*** (муфта ковзання). Ведучий вал 4 обертає індуктор, що складається з магнітопроводу 3 і котушки збудження 2. До індуктора через щітки 5 і контактні кільця 6 підводиться під час роботи постійна напруга $\mathbf{U_в}$. Магнітний потік замикається через повітряний зазор і якір 1. У результаті взаємодії струмів, що індукують в якорі при обертанні індуктора, і створюваних його обмоткою 2 магнітного потоку **Ф,** виникає обертаючий момент. Якір починає обертатися слідом за індуктором і обертати ведений вал 7. За принципом дії цієї муфти необхідно, щоб якір обертався трохи повільніше, а ніж індуктор, тому що в іншому випадку у якорі не буде індукувати струм і зникне обертаючий момент. Різниця між частотою обертання індуктора (і зв'язаного з ним ведучого вала) і частотою обертання веденого вала називається ковзанням, а муфти такого типу часто називають муфтами ковзання.

Перевагами розглянутої асинхронної муфти є висока надійність, довговічність (термін служби), а також можливість плавно регулювати переданий момент за рахунок зміни напруги $\mathbf{U_в}$, підведеної до обмотки збудження індуктора. Подібні муфти виготовляються для передачі потужності від кількох ватів до тисяч кіловатів.

Тема 14. Електричні двигуни постійного струму.

Електричні двигуни постійного струму широко застосовуються в устроях автоматики в якості ВЕ, що перетворюють електричний струм у механічну величину – обертаючий момент. Конструкція електродвигуна постійного струму показана на рис. 6.6, *а*. Основними елементами двигуна є нерухомий статор (корпус 1, полюси 2 з полюсними наконечниками 3 і обмотка збудження 4) і якір (запресований на вал 6 циліндричний магнітопровод з пазами 5, обмотка якоря 7, розташована в пазах

магнітопроводу, колектор 8, до якого припаяні виводи секцій обмотки). Струм до якоря двигуна підводиться через вугільні щітки 9. Струм в обмотці збудження 4, створює магнітний потік **$\Phi_в$**, що пронизує секції 7 обмотки якоря 5. В результаті взаємоді магнітного

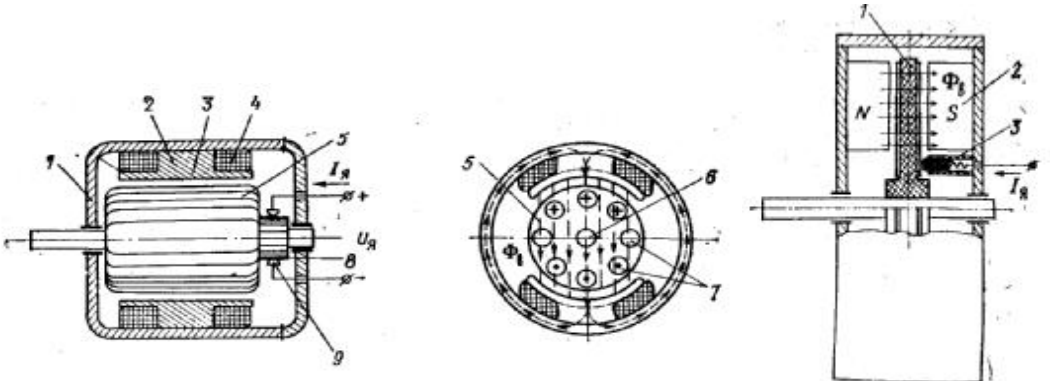


Рисунок 6.6 – Електродвигун постійного струму: *а* – класичний; б – дисковий

потоку **$\Phi_в$** з електричним струмом, що протікає в обмотці якоря **$I_я$**, виникає обертаючий момент **$M_а$** і якір починає обертатися з частотою **ω**.

У малопотужних електродвигунах для створення магнітного потоку збудження часто використовують постійні магніти, що дозволяє створювати нові конструкції електродвигунів постійного струму, наприклад, електродвигун з дисковим якорем, обмотка якого виконується друкованим способом і одночасно є колектором. Такі електродвигуни мають невеликий момент інерції якорю і можуть використовуватися у швидкодіючих устроях автоматики (рис. 6.6, б). Дисковий якір 1 із друкованою обмоткою, розташованій по торцових сторонах диска, обертається між полюсами постійного магніту 2. Струм до якоря підводиться через щітки 3.

У залежності від схеми вмикання обмотки збудження електродвигуни постійного струму поділяються на двигуни з рівнобіжним (або незалежним)

збудженням, послідовним і змішаним (із двома обмотками збудження – рівнобіжної і послідовної).

Переваги електродвигунів постійного струму: великий обертаючий момент за порівняно невеликих габаритах двигуна; широкий діапазон регулювання частоти обертання. *Недоліки*: механічний і електричний знос колектора і щіток (ерозія) і в зв'язку з цим невисокі надійність, довговічність і необхідність постійного догляду за колектором і щітками; великі перешкоди в радіоапаратурі внаслідок іскрового розряду між колектором і щітками в момент переключення секцій обмотки; великий момент інерції якорю і порівняно велика постійна часу (Т = 0,05...0,2 с).

Останнім часом для швидкодіючого електроприводу розроблені спеціальні малоінерційні електродвигуни постійного струму. У цих двигунів момент інерції якорю істотно зменшений за рахунок зменшення діаметру якорю при одночасному збільшенні його активної довжини. Відношення активної довжини до діаметра цих двигунів може досягати 4 (а у двигуна нормального виконання воно дорівнює 1...2).

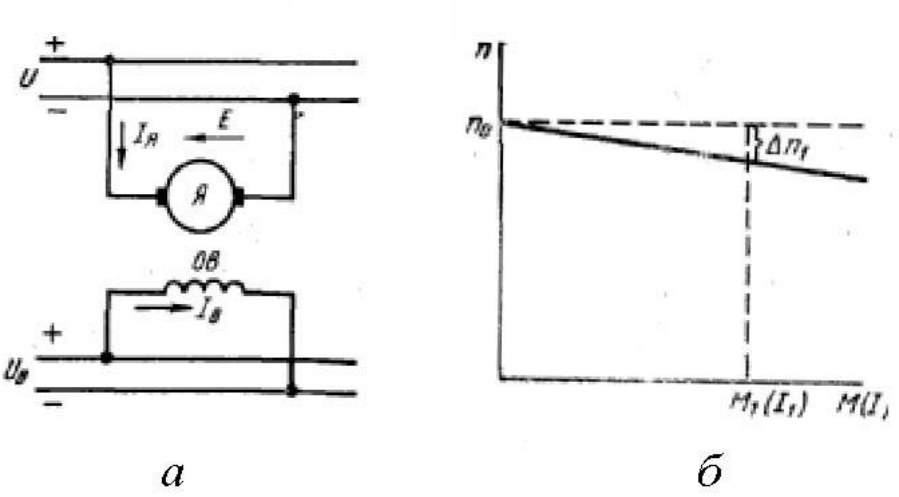
Д**вигун незалежного збудження:** живлення якоря двигуна та обмотки збудження провадиться від незалежних джерел енергії **U** та $\mathbf{U_в}$ (рис. 6.7). Якір двигуна обертається в магнітному полі, створюваному обмоткою збудження. При цьому в обмотці якоря наводиться електрорушійна сила **E**, що визначається за формулою:

$$E = k_E \Phi_n = \frac{pn}{60}\frac{N}{a}\Phi \quad , \qquad (6.1)$$

де p – число пар головних полюсів; n – частота обертання якоря, хв$^{-1}$; N – число активних провідників обмотки якорю; a – число пар рівнобіжних гілок обмотки якорю; **Ф** – корисний магнітний потік одного полюса; k – конструктивна постійна ЕРС двигуна**:** $k_E = p\,N / (60\,a)$**.**

Струм якоря при сталому режимі:

$$I_я = (U - E) / R_я \qquad (6.2)$$



а *б*

Рисунок 6.7 – Схема вмикання (*а*) і природна механічна характеристика (*б*) двигуна незалежного збудження

Електромагнітний момент:

$$M_a = K_м Ф I_я \qquad (6.3)$$

де $k_М = p N / (2 \pi a)$ – конструктивна постійна моменту двигуна.

Струм якоря:

$$I_я = M_а / (k_м Ф) \qquad (6.4)$$

Рівняння електричної рівноваги якірного ланцюга при сталому режимі:

$$U = E + I_я R_я = K_E Ф n + I_я R_я \qquad (6.5)$$

Корисна механічна потужність **P** менша за електромагнітну потужность $P_а$ на величину потужності механічних втрат (втрати в підшипниках, вентиляторні, на тертя щіток об колектор) і потужності втрат у сталі (втрати на гістерезіс і вихрові струми в сердечнику якоря і зубцях). Звичайно втрати в двигуні оцінюють коефіцієнтом корисної дії (ККД), під яким розуміють відношення корисної механічної потужності **P** до потужності, що підведена до двигуна.

Аналітичний вираз механічної характеристики (з рівняння 6.5):

$$n = \frac{U}{k_E c} - \frac{I_я R_я}{k_E c} \qquad (6.6)$$

або

$$n = \frac{U}{k_E \Phi} - \frac{M_a R_я}{k_E k_M c^2} = n_0 - \Delta n \qquad (6.7)$$

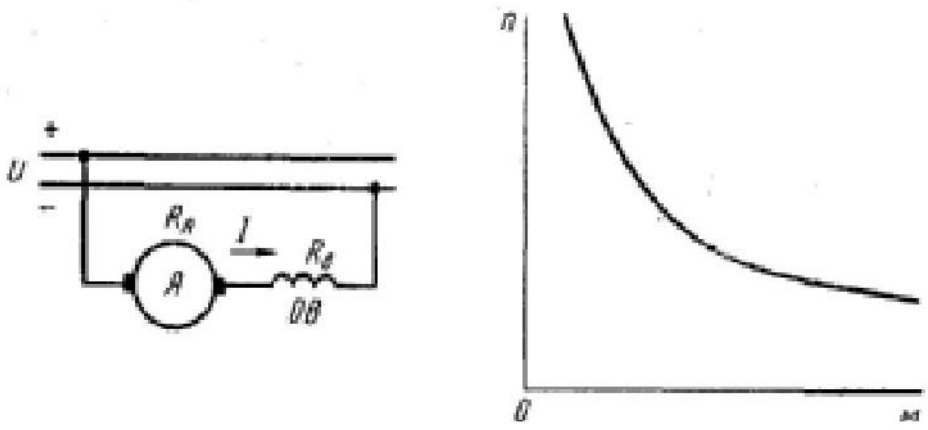
Отже, в рівняння механічної характеристики входить електромагнітний момент. Як відзначалося вище, при практичних розрахунках можна вважати, що $\mathbf{M \approx M_a}$. У рівнянні механічної характеристики (6.7) :

– $\mathbf{n_0 = U / (k_E \Phi)}$ – швидкість ідеального холостого ходу двигуна (при $M = 0$ та $I = 0$);

– $\mathbf{\Delta n = M R_я / (k_E k_M \Phi^2) = I_я R_я / (k_E \Phi)}$ – перепад швидкості обертання за даними моментом **M** і опором якорю $\mathbf{R_я}$. За номінальних параметрів двигуна маємо природну механічну характеристику. Рівняння (6.6) і (6.7) показують, що залежності $\mathbf{n=f(M), n=f(I_я)}$ мають вигляд прямої лінії і швидкість двигуна зі збільшенням навантаження падає (рис. 6.7, б).

Двигун послідовного збудження: обмотка якоря з'єднується послідовно з обмоткою збудження 0В (рис. 6.8, *а*). Потік збудження

$$c = K_ф I_я \qquad (6.8)$$



а б

Рисунок 6.8 – Схема включення (*а*) і природна механічна характеристика (*б)* двигуна послідовного збудження

Корисний момент наближено дорівнює електромагнітному моменту

$$M \approx K_м I_я = K_м K_ф I_я^2 \qquad (6.9)$$

Струм якоря

$$I_я = \sqrt{\frac{M}{K_м K_ф}} \qquad (6.10)$$

Частота обертання

$$n = \frac{U}{k_E \Phi} - \frac{R_я + R_я}{k_E c} I_я \qquad (6.11)$$

Аналітичний вираз механічної характеристики двигуна послідовного збудження:

$$n = \frac{U}{K_E K_\Phi \sqrt{\frac{M}{K_м K_ф}}} - \frac{R_Я + R_В}{K_E K_ф} \qquad (6.12)$$

Рівняння (6.12) вказує, що в межах малих струмів, механічна характеристика має велику крутість і асимптотично наближується до осі ординат. В міру зросту навантаження крутість зменшується і при насиченні магнітної системи можна вважати, що двигун працює з незмінним потоком і ця ділянка характеристики має малу крутість, аналогічну характеристиці двигуна з незалежним збудженням.

На рис. 6.8, *б* наведена природна механічна характеристика двигуна послідовного збудження, яка є м'якою. Зі зменшенням навантаження швидкість обертання двигуна збільшується і при малих значеннях моменту це може призвести до аварії (при $M = 0$ теоретично $n = \infty$). Тому двигун послідовного збудження вхолосту пускати не можна. Фізично це пояснюється тим, що при роботі ЕРС двигуна мало відрізняється від напруги на щітках. Із зменшенням струму якорю зменшується магнітний потік і збільшення ЕРС практично до величини напруги мережі можливо тільки за рахунок збільшення швидкості двигуна.

Двигуни послідовного збудження за нормальної схеми вмикання не мають швидкості ідеального холостого ходу, тому вони не можуть працювати в генераторному режимові. Для двигуна послідовного збудження можливі два гальмових режими: гальмування противмиканням і динамічне гальмування.

Двигун змішаного збудження має на головних полюсах дві обмотки збудження (рис. 6.9, *а*). Одна з них (ОВ1) вмикається послідовно в якірний ланцюг двигуна, а інша (ОВ2) – паралельно якореві, тобто дістає живлення від мережі. За своїми властивостями двигун змішаного збудження займає проміжне положення між двигунами незалежного і послідовного

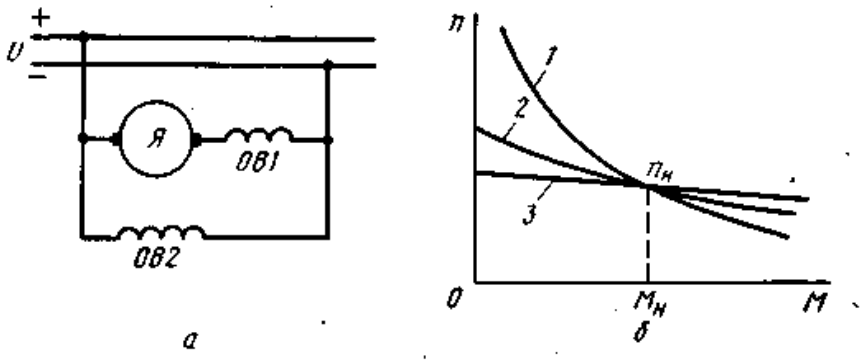


Рисунок 6.9 – Схема включення двигуна змішаного збудження (*а*) і механічні характеристики (б)

збудження. На відміну від двигуна послідовного збудження завдяки обмотці незалежного збудження двигун змішаного збудження має кінцеву швидкість ідеального холостого ходу, обумовлену потоком обмотки ОВ2. Найбільш поширені двигуни, у яких магнітний потік, створюваний обмоткою ОВ2, складає близько 50% від потоку двигуна за номінальним режимом, що забезпечує при холостому ході швидкість двигуна порядку 150...160% від номінальної, тобто механічна характеристика двигуна змішаного збудження м’яка. Аналітичний вираз механічної характеристики двигуна змішаного озбуждения одержати складно. При зміні навантаження (рис. 6.9, б) падіння швидкості двигуна змішаного збудження (крива 2) буде більшим, а ніж у двигуна незалежного збудження (крива 3), але меншим, а ніж у двигуна послідовного збудження (крива 1), тобто механічна характеристика займає середнє положення. Для двигуна змішаного збудження можливі три гальмових режими: генераторний з віддачею енергії в мережу, динамічне гальмування і противмикання. При генераторному режимі, внаслідок зміни напрямку струму, магнітний потік послідовної обмотки спрямований назустріч магнітному потокові незалежної обмотки і гальмовий момент спочатку зросте, а потім зменшиться. Щоб уникнути розмагнічування, у

гальмовому режимі (генераторному і динамічного гальмування), обмотку послідовного збудження шунтують.

Тема 15. Електричні двигуни змінного струму.

Двигуни змінного струму. Принцип роботи всіх двигунів змінного струму заснований на взаємодії обертового магнітного полю, створюваного обмотками статора (нерухома частина двигуна), з магнітним потоком, створюваним ротором (рухома частина двигуна). Електродвигуни, у яких частота обертання ротора дорівнює частоті обертання магнітного поля статора, називаються синхронними. Електродвигуни, у яких частота обертання ротора менша за частоту обертання магнітного полю статора, називаються асинхронними. У залежності від числа фаз асинхронні електродвигуни поділяються на одно-, дво- і трифазні. Однофазні електродвигуни мають невелику потужність і використовуються головним чином в устроях нерегульованого електроприводу. Трифазні електродвигуни використовуються найчастіше в устроях нерегульованого електроприводу з потужністю від кількох ватів до кіловатів (в устроях електроприводу верстатів, потужних вентиляторів, компресорів, насосів, устроїв пам’яті ЦОМ на магнітних дисках, магнітних барабанах і т.п).

Синхронні електродвигуни потужністю від часток ватів до кількох сотень ватів застосовують в устроях автоматики в тих випадках, коли потрібно підтримувати постійну частоту обертання (в електричних годинних механізмах, стрічкопротягувальних механізмах самописних приладів, програмних пристроях і т.п.). Характерною рисою синхронних двигунів є жорсткий зв’язок між частотою обертання ротора і частотою мережі.

Електродвигуни змінного струму більш надійні і довговічні, а ніж двигуни постійного струму, мають широкий діапазон регулювання частоти обертання, невеликий момент тертя і не створюють перешкод радіоапаратурі через відсутність колектора.

Асинхронні двигуни широко поширені в промисловости, що обумовлюється простотою їхньої конструкції і надійністю в експлуатації. Трифазна обмотка статора (рис. 6.10, *а*) двигуна одержує живлення від трифазної мережі змінного струму напругою $\mathbf{U_1}$, частотою $\boldsymbol{f_1}$ і створює обертовий магнітний потік **Ф.** Останній, перетинаючи провідники ротора, наводить у них електрорушійну силу $\mathbf{E_2}$ і, якщо ланцюг ротора замкнений, то в його провідниках буде протікати струм ротора $\mathbf{I_2}$, який, взаємодіючи з магнітним потоком **Ф**, створює на роторі обертаючий момент. Він захоплює ротор у напрямку обертання магнітного потоку, що обертається із синхронною частотою обертання полю статора:

$$n_0 = 60\, f_1 / p \qquad (6.13)$$

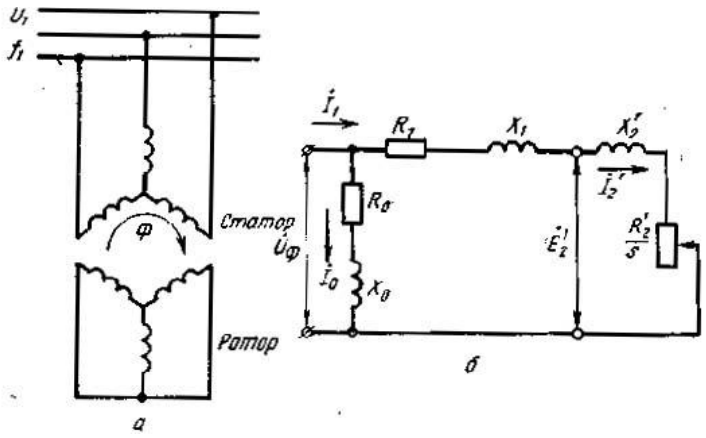


Рисунок 6.10 – Схема включення (*а*) і спрощена схема заміщення (*б*) асинхронного двигуна

або із синхронною кутовою швидкістю двигуна:

$$\omega_0 = 2\,\pi\, f_1 / p\,, \qquad (6.14)$$

де $\boldsymbol{p}$ – число пар полюсів обмотки статора.

Швидкість обертання двигуна менша за швидкість обертання магнітного потоку і визначається ковзанням **S** двигуна:

$$S = (n_0 - n) / n_0 = (\omega_0 - \omega) / \omega_0 \qquad (6.15)$$

Аналітична залежність механічної характеристики асинхронного двигуна $\mathbf{M = f(S)}$ наведена в [6]. Користуватися таким рівнянням складно. Для спрощення рівняння механічної характеристики активним опором фази статора $\mathbf{R_1}$ щодо величини індуктивного опору $\mathbf{X_1 + X_2}$ можна зневажити. Тоді значення критичного ковзання $\mathbf{S_к}$, при якому двигун має максимальний (критичний) момент $\mathbf{M_к}$, знаходять, дорівнюючи за загальним правилом похідну dM / dS нулеві:

$$\mathbf{S_к = \pm R_2 / (X_1 + X_2),} \qquad (6.16)$$

де $\mathbf{R_2}$ і $\mathbf{X_2}$ – активний і індуктивний опори фази ротора, приведені до обмотки статора; $\mathbf{X_1}$- індуктивний опір фази статора.

Підставляючи (6.16) в аналітичну залежність механічної характеристики асинхронного двигуна [6], знаходимо:

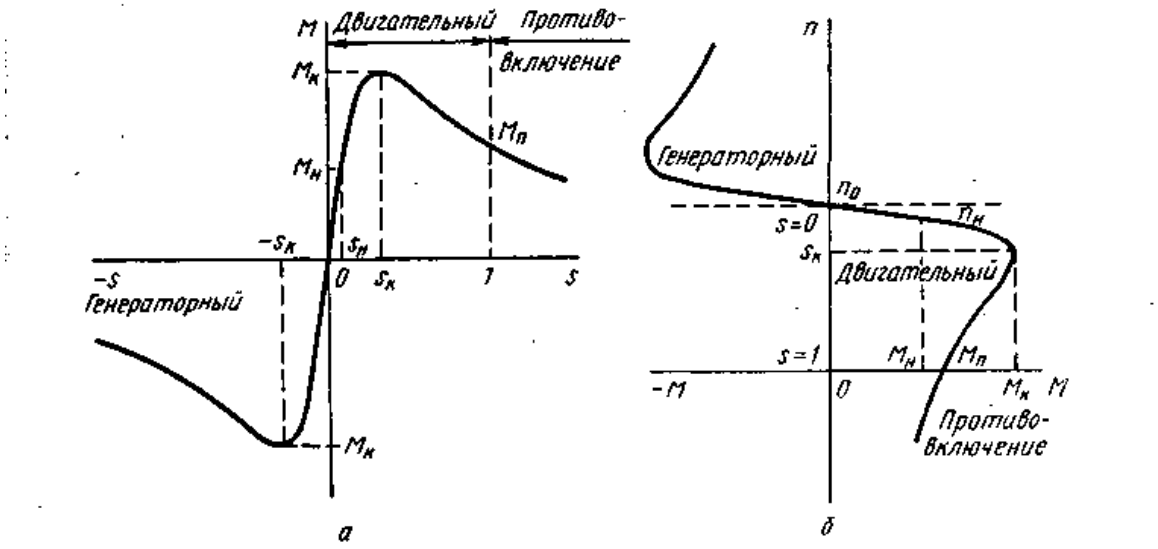


Рисунок 6.11 – Механічна характеристика асинхронного двигуна:

а - $\mathbf{M = f(S)}$; *б* - $\mathrm{n} = \mathbf{f(M)}$

$$\mathbf{M_к = \pm 3U_ф^2 / [2\,\omega_0 (X_1 + X_2)]} \qquad (6.17)$$

Знак "+" у рівняннях (6.16) і (6.17) відноситься до рухомого режиму, а знак "–" до генераторного.

Наближений аналітичний вираз механічної характеристики асинхронного двигуна:

$$M = 2\,M_к / [\,S / Sк + S_к / S\,] \qquad (6.18)$$

Побудована за цією формулою механічна характеристика асинхронного двигуна наведена на рис. 6.11.

Ділянку характеристики від $S = S_к$ до $S = +\infty$ називають хитливою, тому що при збільшенні навантаження зменшується швидкість двигуна і, відповідно до характеристики, момент двигуна зменшується, що призводить до зупинки двигуна. На механічній характеристиці асинхронного двигуна можна виділити наступні характерні точки:

– синхронна швидкість обертання n_0 (при $M = 0,\ S = 0$) визначає швидкісну границю між рухомим і генераторним режимами;

– номінальна швидкість обертання $n_н$ (при $M = M_н,\ S = S_н$). Номінальне ковзання $S_н$ характеризує крутість механічної характеристики на стійкій частині характеристики;

– максимальний (критичний) момент $M_к$ (при $S = S_к,\ M = M_к$) визначає граничну величину моменту, що розвивається двигуном. Максимальний момент двигуна характеризують коефіцієнтом $\lambda = M_К / M_Н$, який називають перевантажувальною здатністю двигуна;

– початковий пусковий момент $M_п$ (при $S = 1,\ M = M_п$) визначає граничне значення навантажувального моменту, при якому розгін короткозамкненого двигуна неможливий (при пуску навантажувальний момент повинен бути меншим за $M_п$). Пусковий момент двигуна характеризують відношенням $M_п / M_н$, називаним кратністю пускового моменту.

При роботі на стійкій частині природної механічної характеристики, коли S незначна, членом $S/S_к$ відносно $S_к/S$ звичайно зневажають, і рівняння механічної характеристики приймає вигляд:

$$M=2\,M_к\;S\;/\,S_к \qquad (6.19)$$

Синхронний двигун. У статорі синхронного двигуна (рис. 6.12, *а*), як і в асинхронному, створюється обертовий магнітний потік. Роторна обмотка (обмотка збудження) одержує живлення від джерела постійного струму і створює нерухомий щодо ротора потік збудження $\mathbf{\Phi_0}$. Для працюючих машин змінного струму магнітні потоки ротора і статора повинні бути нерухомі відносно один до іншого, тому швидкість обертання ротора в сталому

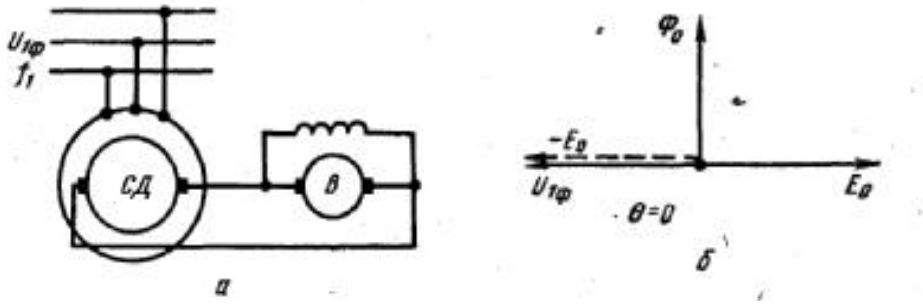


Рисунок 6.12 – Схема включення (*а*) і спрощена векторна діаграма ненавантаженого (*б*) синхронного двигуна.

режимі завжди дорівнює швидкості обертання магнітного потока статора, тобто синхронній швидкості обертання $\mathbf{n_0}$.

Синхронні двигуни одержали широке поширення в прокатних цехах, а також для обертання могутніх генераторів у системах Г- Д.

З гальмових режимів роботи в приводі із синхронним двигуном в основному застосовують динамічне гальмування. Для цього обмотки статора відключають від мережі і замикають на опори. У цьому випадку двигун працює в режимі синхронного генератора і механічні характеристики аналогічні характеристикам за динамічного гальмування асинхронного двигуна.

Основною перевагою синхронних двигунів є високий **cos φ**, що може дорівнювати одиниці, а також може бути випереджальним (приблизно 0,8... 0,9). В останньому випадку двигун буде віддавати в мережу реактивну потужність і виправляти тим самим **cos φ** в мережі споживача.

Синхронні двигуни в приводі прокатних станів більш надійні в порівнянні з асинхронними. Це обумовлюється значно більшим (у 3...4 рази) повітряним зазором між статором і ротором, а також низькою напругою в роторі двигуна (малий зазор у асинхронного двигуна необхідний для зменшення струму, що намагнічує, і поліпшення **cos φ).** До *переваг* синхронного двигуна варто також віднести простоту конструкції і надійність в експлуатації. *Недоліки:* необхідність у постійному струмі для збудження двигуна, а також спеціальних пускових обмоток для одержання прийнятних пускових характеристик.

Синхронний двигун розвиває обертаючий момент лише за умови, якщо ротор обертається синхронно з обертовим магнітним полем статора. При нерухомому роторі обертаючий момент відсутній. Тому для розгону синхронного двигуна ротор останнього забезпечується короткозамкненою обмоткою, стрижні якої закладаються в полюсні наконечники. Двигун пускається в хід як асинхронний короткозамкнений. При досягненні 95...98% синхронної швидкості в обмотку збудження подається постійний струм і ротор у результаті взаємодії магнітних потоків статора і ротора втягується в синхронізм і продовжує працювати, як синхронний. При синхронній швидкості пускова короткозамкнена обмотка не перетинає магнітних ліній, тому в ній не наводиться ЕРС і по ній не протікає струм.

Пускові механічні характеристики асинхронного режиму синхронного двигуна подібні характеристикам короткозамкненого асинхронного двигуна. Останнім часом на металургійних заводах для спрощення операції пуску синхронних двигунів усе ширше впроваджується пуск методом самосинхронізації з підключеним збудником (так називаний "глухий пуск"). У цьому випадку обмотка збудження підключається наглухо до якоря

збудника, яка у процесі пуску самозбуджується і забезпечує втягування двигуна в синхронізм. Процес пуску автоматизований і зводиться до натискання кнопки “Пуск”.

Тема 16. Крокові двигуни.

Крокові двигуни (КД) являють собою багатофазні і багатополюсні синхронні електричні машини, у яких живлення фазних обмоток статора здійснюється імпульсною напругою по черзі, за допомогою електронного комутатору. За кожним імпульсом ротор двигуна повертається на визначений кут, називаний кроком. Крокові двигуни широко застосовуються в цифрових САУ як елемент, що найбільш вдало сполучається з ЦОМ і числовими програмними пристроями.

Застосування КД доцільне в тих випадках, коли потрібно здійснити переривчастий (стартстопний) рух, а також безперервний рух, якщо керуючий сигнал заданий у вигляді серії послідовних імпульсів (унітарного коду) або може бути легко перетворений у таку форму. Прикладами устроїв, де потрібний стартстопний рух, можуть служити стрічкопротягувальні устрої для введення-виводу інформації, що керують золотниками, заслінками. Прикладами устроїв, керованих послідовністю імпульсів, є механізми автоматичних маніпуляторів, графобудівників для виводу інформації з ЦОМ у вигляді схем, креслень, графіків і т.д. Знаходять застосування КД і в авіаційній, ракетній і космічній техніці, у системах управління атомними реакторами. В устроях автоматики найбільше застосування знайшли КД із числом фаз $\mathbf{m \geq 3}$, обмотки яких збуджуються по черзі або групами (паралельно по 2 або 3 обмотки) імпульсами напруги прямокутної форми. На рис. 6.13 зображена схема КД із числом фаз $\mathbf{m= 6}$. Якщо подавати по черзі імпульси напруги на фазні обмотки 1-2-3-4-5-6, то ротор двигуна 7 буде стрибком повертатися в положення, при яких його вісь збігається з віссю фазної обмотки, яка знаходиться під напругою, тобто відповідно 1-2-3-4-5-6.

Таким чином, ротор буде мати шість стійких положень, що відповідають напрямкові вектора сили **F** фазної обмотки, включеної в даний момент часу. Крок двигуна буде при цьому дорівнює **Δα= 360° / m = 360⁰ / 6 = =60°.**

Вибираючи крокový двигун як виконуючий, необхідно враховувати ряд його особливостей:

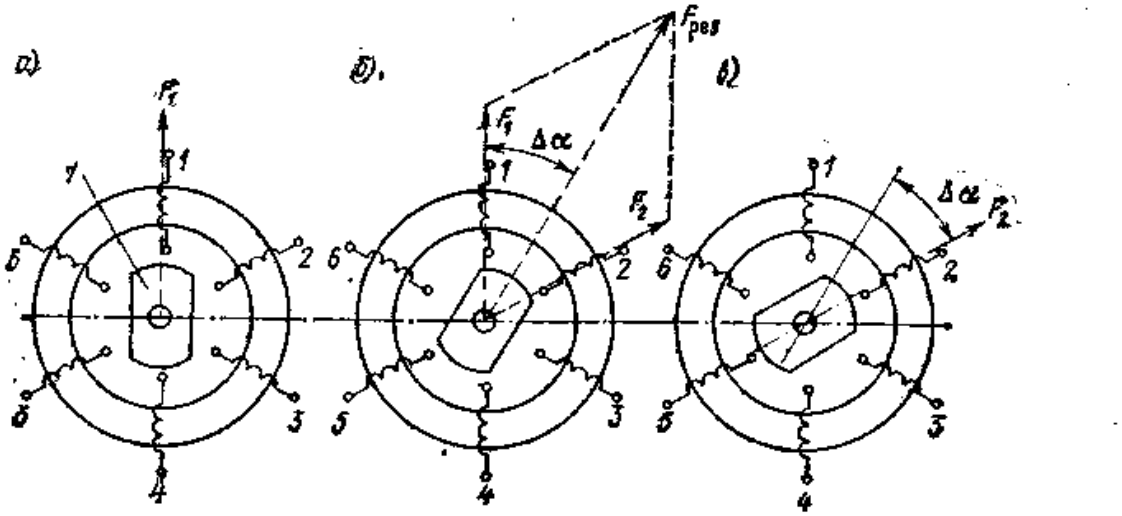


Рисунок 6.13 – Стійкі положення ротора КД при включенні фазних обмоток: *а* –1-ї фази; *б* –1-ї та 2-ї фаз; *в* –2-ї фази

– положення ротора КД у статичному режимі (відсутність керуючих імпульсів) стійке, тому що існує синхронізуючий момент, який фіксує положення ротора стосовно статора. У двигунів постійного і змінного струмів такого моменту немає;

– КД може забезпечити стійке регулювання частоти обертання в широкому діапазоні (від максимальної до нуля);

– у визначеному діапазоні частот КД допускає раптові пуски, зупинки і реверс руху без пропуску (втрати) кроку;

– рух ротора КД дискретний з кроком від 1,5° до 36° у залежності від типу КД і обраного числа тактів комутації фазних обмоток;

– максимальна частота керуючих імпульсів не повинна перевищувати визначеного для кожного типу КД значення, називаного граничною частотою (від кількох сотень герців до 25 кГц).

У порівнянні з устроями електроприводу із двигунами постійного і змінного струмів привод із КД має ряд *переваг*: він простіший, компактніший, надійніший, точніший, стійкіший до зовнішніх впливів. *Недоліки*: менший ККД, обмежену потужність (до 200 Вт), не допускає тривалих перевантажень у зв’язку з напруженим тепловим режимом і малою тепловою інерцією (швидке нагрівання до сталої температури) під час роботи.

Конструкції КД безупинно удосконалюються, створюються зразки двигунів із друкованими обмотками, з беззазорним ротором, що котиться, із хвильовим редуктором, вбудованим у двигун.

Тема 17. Гідравлічні і пневматичні двигуни.

Гідравлічні і пневматичні двигуни перетворюють енергію робочого середовища, що знаходиться під тиском, у механічну енергію поступального або обертового руху. Як робоче середовище в *гідродвигунах* використовують мінеральну олію, спиртогліцеринову суміш, синтетичні рідини і т.ін. У *пневмодвигунах* робочим середовищем служить повітря або газ. Гідро- і пневмодвигуни застосовуються в устроях приводу верстатів, автоматичних маніпуляторів, екскаваторів, піднімальних механізмів, в авіаційній і ракетній техніці і т.д. У устроях автоматичного управління гідро- і пневмодвигуни використовуються рідше, а ніж електричні, але саме вони у ряді випадків виявляються єдино прийнятними для технічного рішення.

Гідро- і пневмодвигуни здатні розвивати дуже великі зусилля за малих габаритах. За цих параметрів вони перевершують всі інші види двигунів. Вони надійно працюють у дуже тяжких умовах, прості за конструкцією, не мають потреби в редукторах для узгодження із об’єктом

управління. За конструкцією і принципом дії між гідравлічними і пневматичними двигунами немає істотної різниці. За конструкцією гідро- і пневмодвигуни поділяються на двигуни з поступальним рухом (поршневі і мембранні) і двигуни з обертовим рухом (шестеренні, лопатеві, плунжерні, турбінні). За способом управління гідро- і пневмодвигуни можуть бути із дросельним та об'ємним управлінням. При дросельному управлінні як керуючі устрої використовуються золотники, устрої типу сопло-заслінка, струмінні трубки. При об'ємному управлінні як джерела енергії робочого середовища використовують насоси або компресори із змінною продуктивністю.

Розглянемо принцип дії гідро- і пневмодвигунів разом з керуючими пристроями, тобто принцип дії устроїв гідро- та пневмоприводу. Для спрощення будемо розглядати тільки гідродвигуни і гідропривод. На рис. 6.14 показаний поршневий гідродвигун із золотниковим управлінням. Допоміжною енергією в цьому устрої є енергія рідини, що нагнітається в трубопровід насосом 1 під тиском. Тиск p підтримується постійним стабілізатором тиску 2. Вхідним впливом служить зміщення золотника 3 керуючого пристрою 4. Вихідним впливом є зміщення штока поршня 5 гідродвигуна. Зусилля від штока (рух) передається безпосередньо на об'єкт управління. Поршень

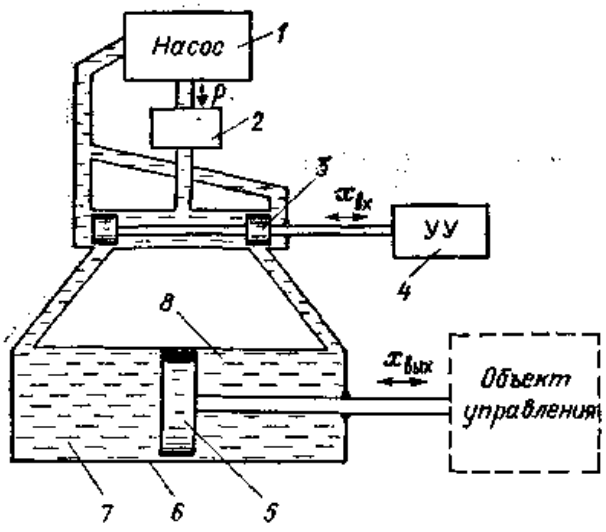


Рисунок 6.14 – Поршнєвий гідродвигун із золотниковим управлінням

гідродвигуна зміщується в силовому циліндрі 6, що має дві камери (порожнини) 7 і 8. Якщо канали, якими камери двигуна з'єднуються з рідиною під тиском, перекриті пасками золотника, то поршень двигуна нерухомий. При зміщенні золотника на величину $\mathbf{X_{вх}}$ в одну камеру двигуна почне надходити рідина під тиском, а друга камера з'єднається з трубопроводом, по якому рідина повертається до насоса (магістраль "злив"). Тиск у камерах двигуна буде різним, і поршень під дією різниці тисків почне зміщуватися. *Швидкість руху поршня залежить від обсягу рідини*, що втікає в одну камеру, і рідини, що випливає з іншої в одиницю часу. Цей обсяг залежить від розміру отворів, через які може протікати рідина після зміщення золотника на величину $\mathbf{X_{вх}}$. Гідродвигун із *двома камерами* розвиває практично однакове зусилля при подачі тиску в одну або іншу камеру, але напрямок руху змінюється на протилежний. В *однокамерних* рух здійснюється під дією поворотної пружини, тобто робочий хід у цих двигунів однобічний. При зміщенні золотника на величину $\mathbf{X_{вх}}$ необхідна потужність, значно менша, а ніж потужність, одержувана на виході двигуна при зміщенні робочого поршня зі штоком (збільшення потужності відбувається за рахунок джерела допоміжної енергії – рідини, що знаходиться під тиском). Такий устрій гідроприводу можна розглядати як підсилювач потужності чи зусилля.

На рис. 6.15 показаний лопатевий двигун з керуючим пристроєм "сопло-заслінка". Рухомою частиною двигуна є вихідний вал 3 з лопатою 5

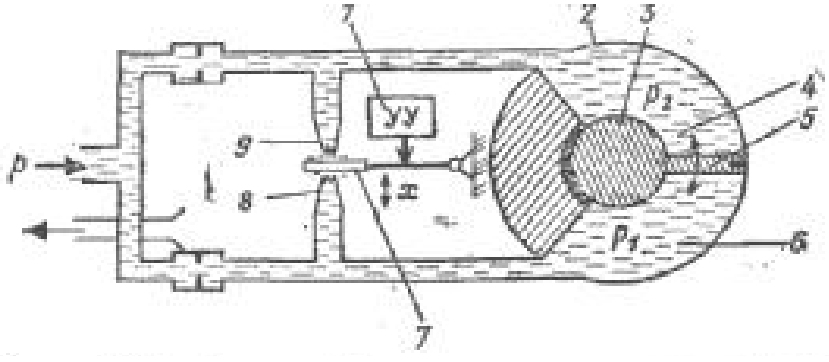


Рисунок 6.15 – Лопатевий двигун з керуючим пристроєм "сопло-заслінка"

розділяє корпус 2 двигуна на дві камери 4 і 6. Тиск рідини в камерах однаковий при нейтральному положенні заслінки 7 стосовно сопел 8 і 9, через які відбувається часткове витікання рідини в магістраль зливу. Зусилля, що діють з боку сопел на заслінку, взаємно компенсуються і для зміщення заслінки не потрібно великого зусилля. При однаковому тиску рідини в камерах 4 і 6 лопата і вихідний вал двигуна нерухомі. Зміщення заслінки від устрою управління (УУ) 1 на величину **X** порушує рівность тисків у камерах двигуна, і лопата з вихідним валом двигуна почнуть повертатися зі швидкістю, пропорційною різниці тисків у камерах, а отже, зсувові заслінки. Кут повороту вихідного вала такого двигуна менший за 360°.

На рис. 6.16 показаний поршневий поворотний двигун з управлінням від струмінної трубки. Двигун має один поршень, але конструктивно розділений на дві частини 2 і 5, зв’язані між собою жорстко за допомогою зубцюватої рейки 3. З рейкою знаходиться в зачепленні зубчасте колесо 4, вал якого і є вихідним валом двигуна. При повороті струмінної трубки 7 струмінь рідини буде по-різному розташовуватися стосовно сопел 6 і 8, і поршень 2 призведе в обертання вихідний вал 4. Кут повороту вихідного вала у цього двигуна може

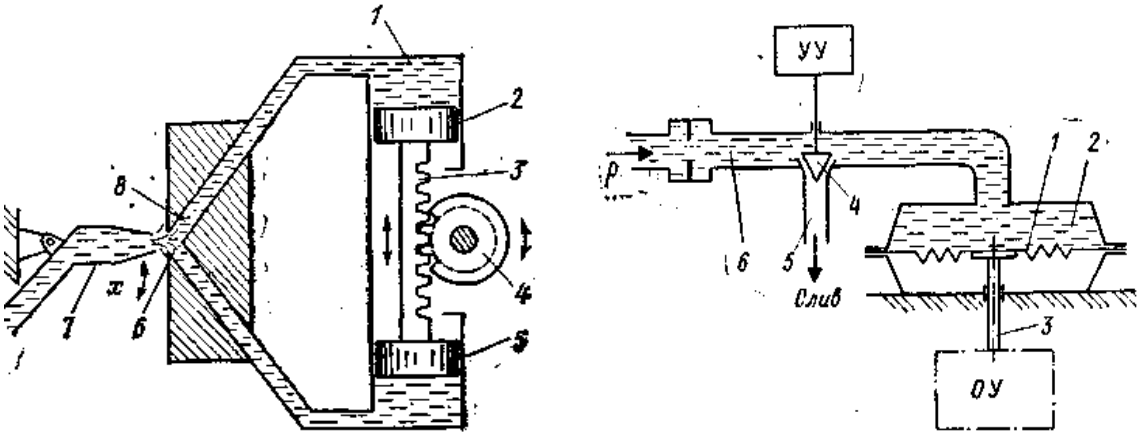


Рисунок 6.16 – Поршнєвій поворотний двигун з управлінням від струминної трубки

Рисунок 6.17 – Мембранний двигун з управлінням голчастим клапаном

бути більшим за 360°, якщо рейка має достатню довжину. На рис. 6.17 показаний мембранний двигун з управлінням від голчастого клапана. Такі двигуни застосовуються в тих випадках, коли потрібна невелика вихідна потужність і невелике зміщення (до 50 мм). Пружна мембрана 1 (металева або гумова) під дією тиску рідини, що надходить у камеру 2, прогинається і передає рух на шток 3, зв'язаний з об'єктом управління (ОУ). Управління двигуном здійснюється від голчастого клапана. Зміна положення голівки голки 4 змінює кількість рідини, що надходить з магістралі тиску 6 у зливальну магістраль 5. При цьому змінюється тиск у камері двигуна і відбувається прогин мембрани.

Принцип роботи розглянутих устроїв гідроприводу не зміниться, якщо робочим середовищем буде не рідина, а повітря або газ. Такий привод буде називатися пневмоприводом. *Пневмопривод має меншу швидкодію*, а ніж гідропривод. Запізнення в роботі пневмоприводу обумовлено, крім стиснення повітря або газу, також впливом довжини, діаметру, конфігурації і матеріалу трубопроводів і чистоти внутрішньої поверхні. *Перевагою* пневмоприводів є менш жорсткі вимоги до точності виготовлення елементів, а ніж для гідроприводу. У пневмоприводі допускається невеликий витік повітря в атмосферу. Устрої пневмоприводу зручні при використанні на об'єктах короткочасної або разової дії, на яких джерелом енергії служать балони, що акумулюють стиснене повітря або газ.

Пневматичні елементи автоматики і пневмопривод знаходять широке застосування при автоматизації виробництва в хімічній промисловості, там, де небезпечне застосування електричних елементів. Область автоматики, що займається вивченням і розробкою пневматичних елементів і пристроїв автоматики, називається *пневмонікою*.

Для управління зміщенням золотників, заслінок, струмінних трубок у устроях гідро- і пневмопривода часто використовують силові електромагніти, електродвигуни малої потужності, які є виконавчими елементами електричних устроїв автоматичного управління. Такий привод називається комбінованим – электрогідравлічним або електропневматичним і об'єднує переваги як електричних, так і гідравлічних та пневматичних устроїв автоматики.