

Розділ IV. Трансформатори. Електричні машини
Тема 4.2 «Електричні машини постійного струму»

Лекція 12

Двигуни постійного струму: обертаючий момент, механічна потужність, схеми вмикання, механічні характеристики, способи пуску, реверсування та регулювання частоти обертання

Мета: оволодіти знаннями про двигуни постійного струму.

Методи: словесний, практичний, наочний.

План:

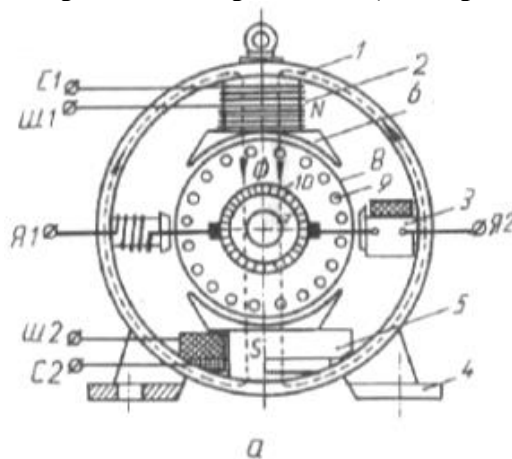
1. Будова та принцип роботи. Обертаючий (електромагнітний) момент.
2. Струм якоря і частота обертання двигуна постійного струму.
3. Пуск, зупинка і реверс двигунів постійного струму.
4. Двигуни з послідовним збудженням.
5. Двигуни зі змішаним збудженням.

Машини постійного струму мають властивість оборотності, тобто вони можуть працювати як в режимі генератора, так і в режимі двигуна. Тому якщо машину постійного струму увімкнути до джерела енергії постійного струму, то вона буде перетворювати електричну енергію в механічну, яка, в свою чергу, передається валом робочому механізму.

В установках, де потрібне регулювання швидкості в широких межах, швидкодія і великі пускові моменти, найчастіше використовуються двигуни постійного струму. Через прийнятні експлуатаційні характеристики двигуни постійного струму практично є основними в тягових приводах.

Головним недоліком двигунів постійного струму є наявність ковзкого контакту щітки – колектор, що потребує систематичного контролю та зміни щіток. Цей контакт є джерелом радіозавад, для усунення яких іноді доводиться застосовувати спеціальні фільтри. Двигуни постійного струму широко використовуються у системах автоматики й телемеханіки.

1. Будова та принцип роботи. Обертаючий (електромагнітний) момент.



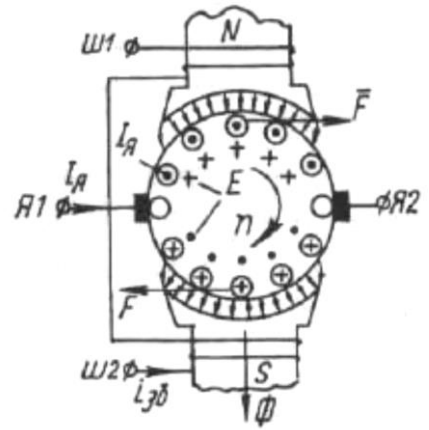
Мал. 1. Будова машини постійного струму:

- 1 – станина; 2 – осердя головного полюса; 3 – додатковий полюс; 4 – лапи; 5 – обвитка збудження; 6 – полюсний наконечник; 7 – вал; 8 – осердя якоря; 9 – обвитка якоря; 10 – колектор

Розглянемо роботу машини постійного струму (мал. 2) в режимі двигуна. До обмотки збудження подається із мережі постійний струм $i_{зб}$, який утворює головне

магнітне поле машини Φ . Це магнітне поле проходить від північного N до південного полюса S через якір,

два повітряні проміжки між полюсними наконечниками та якорем, та замикається на станині машини. Одночасно подається постійний струм до клем якоря. Проходячи через щітки і колектор, струм в обвитці якоря буде протікати вже змінний: у всіх провідниках якоря під полюсом N струми течуть в одному напрямі, а під полюсом S – у протилежному напрямі (мал. 2). При переході провідника з-під полюса N під полюс S через фізичну нейтраль струм у провіднику змінює свій напрям на протилежний. Отже, колектор у двигунах постійного струму працює в режимі інвертора – перетворює постійний струм у змінний. За законом Ампера на провідники зі струмом в магнітному полі діє сила F , напрям якої визначається за правилом «лівої руки». Ця сила створює обертаючий (електромагнітний) момент M і змушує якір обертатись.



Мал. 2. До визначення обертаючого (електромагнітного) моменту двигуна постійного струму

Обертаючий (електромагнітний) момент двигуна постійного струму визначається двома значеннями: магнітним потоком і струмом якоря

$$M = C_M \Phi I_A$$

Де Φ – магнітний потік якоря;

I_A – струм якоря;

$C_M = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2\pi}$ – коефіцієнт, який залежить від конструктивних даних машини;

N – кількість провідників якоря;

a – кількість пар паралельних віток якоря;

p – кількість полюсів машини.

2. Струм якоря і частота обертання двигуна постійного струму.

В процесі роботи двигуна його якір обертається в постійному магнітному полі. В обвитці якоря буде індукуватись ЕРС E , напрямлена проти струму якоря I_A , тому її називають **протиелектрорушійною силою** (проти-ЕРС) якоря. Вона визначається за формулою:

$$E = C_e n \Phi$$

За другим законом Кірхгофа отримаємо основне рівняння рівноваги напруг двигуна:

$$U = E + r_A I_A$$

Помноживши ліву і праву частини рівняння на струм I_A , отримаємо рівняння потужностей з якого видно, що ЕРС зрівноважується тією часткою напруги зовнішнього джерела, яка відповідає механічному навантаженню двигуна

$$U I_A = E I_A + r_A I_A^2$$

Де $U I_A$ – потужність, яку двигун споживає з мережі;

$r_A I_A^2$ – потужність витрат в обвитці якоря;

$E I_A$ – електромагнітна потужність, яка в остаточному результаті перетворюється в механічну потужність на валу двигуна.

Значення струму якоря:

$$I_A = \frac{U - E}{r_A} = \frac{U - C_e \Phi n}{r_A}$$

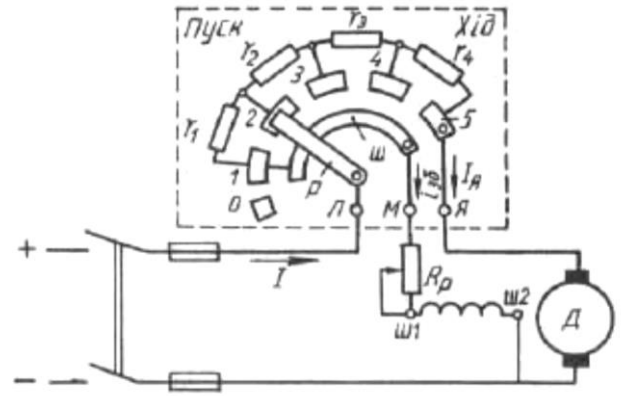
Частота обертання, до якої розганяється двигун постійного струму:

$$n = \frac{U - r_A I_A}{C_e \Phi}$$

Як видно з формули, частота обертання двигунів постійного струму в основному визначається прикладеною напругою U та магнітним потоком Φ . Збільшення напруги або зменшення величини магнітного потоку приводить до підвищення частоти обертання.

3. Пуск, зупинка і реверс двигунів постійного струму.

У перший момент після вмикання двигуна в мережу, коли якір ще не встиг розкритись ($n = 0$), проти-ЕРС дорівнює 0. Сила пускового струму обмежується тільки опором кола якоря $I_{\text{я}} = \frac{U}{r_{\text{я}}}$, і може в декілька разів (10-15 раз) перевищувати номінальне значення. Такий великий струм може пошкодити колектор, щітки і навіть обвитку якоря. Крім того, при такому струмі в двигуні розвивається надмірно великий пусковий момент, який викликає ударну дію на обертові частини і машину загалом, і може призвести до механічного пошкодження. Крім того, цей струм викликає різке падіння напруги в мережі, що негативно впливає на інших споживачів і на саму мережу. Тому запуск двигуна безпосереднім вмиканням в мережу (безреостатний запуск) переважно проводять для двигунів малої потужності (не більше 0,7-1,0 кВт). У цих двигунах внаслідок підвищеного опору обвитки якоря і невеликих обертових мас значення пускового струму лише в 3-5 разів перевищує номінальний, що не є небезпечним для двигуна. Що стосується двигунів середньої та великої потужності, то під час їх пуску для обмеження пускового струму послідовно в коло якоря на час пуску вмикається пусковий реостат (ПР) - $R_{\text{п}}$ (мал. 3).



Мал. 3. Схема пуску шунтового двигуна з монтажною схемою пускового реостата

Перед пуском двигуна необхідно ручку Р пускового реостата поставити на неробочий хід «0». Відтак вмикають рубильник, далі переводять ручку Р на перший проміжний контакт «1» і коло якоря двигуна буде увімкнене в мережу послідовно з усіма ступенями ПР $R_{\text{п}} = r_{\text{п1}} + r_{\text{п2}} + r_{\text{п3}} + r_{\text{п4}}$. Одночасно через ручку Р і шину III до мережі вмикається обвитка збудження. Пусковий струм становитиме

$$I_{\text{пmax}} = \frac{U}{r_{\text{я}} + R_{\text{п}}}$$

З появою струму в колі якоря $I_{\text{пmax}}$ виникає пусковий момент $M_{\text{пmax}}$ під дією якого якір починає обертатись. З наростанням частоти обертання n збільшується проти-ЕРС, що веде до зменшення пускового моменту. У міру розганяння якоря двигуна ручку ПР Р переводимо в положення 2, 3 і т.д. В положенні 5 ручки реостата пуск двигуна закінчується, пусковий опір повністю виведений ($R_{\text{п}} = 0$). Опір пускового реостата вибирають переважно таким, щоб найбільший пусковий струм не перевищував номінальний більше ніж у 2-3 рази. Для збільшення пускового моменту під час пуску регульовальний реостат в колі збудження $R_{\text{р}}$ треба повністю вивести.

Зупинка. При зупинці двигуна бажано спочатку перевести ручку ПР на неробочий контакт «0», а потім вимкнути рубильник із мережі. Схема комутації пускового реостата забезпечує при зупинці двигуна, коли ручка Р ПР встановлюється на контакт неробочого ходу «0», замикання кола збудження через обвитку якоря і пусковий реостат. Нагромаджена в обвитці збудження енергія при вимкненні двигуна витрачається в опорах обвитки якоря, обвитки збудження і пускового реостата. Розмикання кола збудження вкрай небажане, бо через велику індуктивність обвитки збудження при її розмиканні можлива значна перенапруга, небезпечна для ізоляції. Крім того, вимикання збудження призводить до різкого зростання частоти обертання.

Для пуску двигунів великої потужності застосовувати пускові реостати недоцільно, тому що це викличе велику затрату енергії. Крім того, пускові реостати були б дуже громіздкими. Тому в двигунах великої потужності застосовують безреостатний пуск двигуна, понижуючи напругу. Наприклад, пуск тягових двигунів електровоза перемиканням їх з послідовного сполучення при пуску на паралельне при нормальній роботі.

Реверс. Напря́м оберта́ння я́коря дви́гуна зале́жить від на́пряму ма́гнітного пото́ку Φ і стру́му в обвита́х я́коря $I_{\text{я}}$: $M = C_M \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}}$. Тому, змінюючи на́пря́м будь-яко́ї із наведених величин, можна змінити на́пря́м оберта́ння я́коря. Необхідно враховувати, що перемика́ння за́гальних за́тискачів на рубильнику не дасть зміни на́пря́му оберта́ння, тому що одночасно зміняться на́пря́м стру́му я́коря і на́пря́м стру́му збудже́ння.

4. Двигуни з послідовним збудженням.

В цих двигунах обмотка збудження вмикається послідовно з колом якоря (мал. 4), тому магнітний потік Φ залежить від струму навантаження. При невеликих навантаженнях магнітна система машини ненасичена й залежність Φ від I прямо пропорційна, тобто $\Phi = kI$. У цьому випадку електромагнітний момент пропорційний квадрату струму, а частота обертання зворотно пропорційна струму:

$$M = C_M \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} = C_M \cdot k \cdot I \cdot I = C_M \cdot I^2$$

$$n = \frac{U - r_{\text{я}} I_{\text{я}}}{C_e \cdot \Phi} = \frac{U - r_{\text{я}} I}{C \cdot I}$$

Де k – коефіцієнт пропорційності між I та Φ .

На мал. 5, а відображені робочі характеристики $M = f(I)$ та $n = f(I)$ двигуна послідовного збудження (серієсного двигуна). При великих навантаженнях настає насичення магнітної системи двигуна і тоді магнітний потік при зростанні I практично вже не збільшується, характеристики двигуна стають майже прямолінійними. Частота обертання серієсного двигуна значно змінюється при зміні навантаження. Таку характеристику називають м'якою.

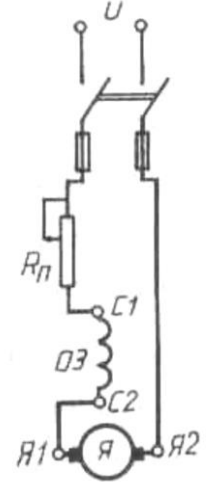
При зменшенні навантаження серієсного двигуна різко зростає частота його обертання, а при навантаженнях, менших, ніж 25% від номінального, може досягти небезпечних для двигуна значень («рознесення»). Тому робота двигуна послідовного збудження, а також його пуск при навантаженні на валу, меншому за 25% від номінального – недопустимі.

Для надійнішої роботи вал серієсного двигуна повинен бути жорстко з'єднаним з робочим механізмом (за допомогою муфти, зубчатою передачею тощо). Застосування ремінної передачі недопустиме, оскільки при обриві чи скиданні ременя може відбутися «рознесення» двигуна. Отже, ці двигуни не можуть працювати в режимі неробочого ходу.

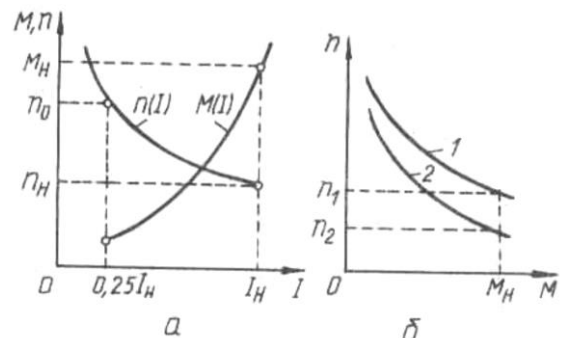
Властивість серієсних двигунів розвивати великий обертовий момент, пропорційний квадрату струму, має важливе значення, особливо у важких умовах пуску та при перевантаженні, тому що з поступовим наростанням струму двигуна потужність його на вході росте повільніше ніж обертовий момент. Ця особливість є однією з причин їх широкого застосування як тягових двигунів на транспорті, а також як кранових двигунів у підймальних установках, тобто у всіх видах електропривода з важкими умовами пуску, поєднаними із значним навантаженням на вал двигуна при малій частоті обертання.

Частоту обертання двигуна послідовного збудження можна регулювати зміною напруги U , або потоку збудження.

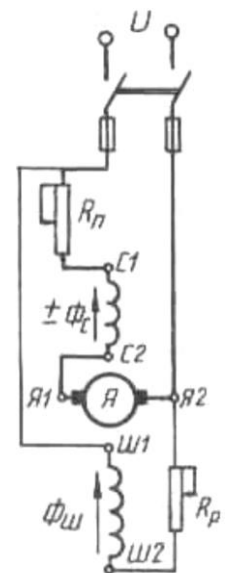
Змінювати прикладену до двигуна напругу можливо при



Мал. 4. Схема серієсного двигуна



Мал. 5. Робочі (а) та механічні (б) характеристики серієсного двигуна



Мал. 6. Схема двигуна із змішаним збудженням

живленні його від окремого джерела постійного струму з регульованою напругою. При зменшенні підведеної до двигуна напруги його механічні характеристики зміщуються вниз.

Регулювати n зміною Φ можна шунтуванням обвитки збудження (вмиканням паралельно реостата) – збільшення n , а також шунтуванням обвитки якоря – зменшення n . Цей спосіб застосовують тільки для двигунів малої потужності. Для двигунів великої потужності вмикання паралельно опорів неекономічне, великі затрати енергії.

При сумісній роботі декількох однотипних двигунів частоту обертання можна регулювати зміною схеми їх вмикання. Так, при паралельному увімкненні, наприклад, двох двигунів, кожен із них буде під повною напругою мережі, а при послідовному – на кожен двигун припаде половина напруги мережі. Цей спосіб регулювання часто застосовують в електропоїздах.

5. Двигуни зі змішаним збудженням.

Двигуни змішаного збудження (компаундні двигуни) мають дві обвитки збудження: паралельну (шунтову) і послідовну (серієсну) (мал. 6).

Частота обертання цього двигуна:

$$n = \frac{U - r_{\text{я}} I_{\text{я}}}{C_e \cdot (\Phi_{\text{ш}} \pm \Phi_{\text{с}})}$$

Де $\Phi_{\text{ш}}$, $\Phi_{\text{с}}$ – потоки паралельної і послідовної обвитки збудження.

Знак «+» відповідає узгодженому вмиканню обмоток збудження. В цьому випадку із збільшенням навантаження загальний магнітний потік зростає, що веде до зменшення частоти обертання і збільшення електромагнітного моменту.

При зустрічному увімкненні обмоток збудження (знак «-») і при збільшенні навантаження потік $\Phi_{\text{с}}$ зростає і розмагнічує машину, що приводить до підвищення частоти обертання. Робота двигуна стає нестійкою, тому що із зростанням навантаження частота обертання необмежено зростає. Однак якщо кількість витків послідовної обвитки невелика, із збільшенням навантаження частота обертання не збільшується.

Двигун змішаного збудження має перевагу над двигуном послідовного збудження: не боїться режиму неробочого ходу; дає змогу регулювати оберти реостатом в колі збудження шунтової обвитки. Ці двигуни застосовують переважно там, де потрібні значні пускові моменти; великі прискорення під час розганяння; стійка робота і незначна зміна частоти обертання при зміні навантаження на валу (прокатні стани, вантажні підйомники, насоси, компресори тощо).

Знання, корисні для практики!

Творцем першого електромотора був Майкл Фарадей. Незважаючи на те, що його прототип не можна назвати повноцінною робочою версією, але саме він зробив відкриття, яке підштовхнуло винахідників до створення електродвигуна. У 1821 році Фарадей здійснив знаменитий досвід: опустив в ємність з магнітом заряджений дріт. Металевий провідник при взаємодії з полем магніту став рухатися, трансформуючи таким чином електроенергію в механічну. Після цього відкриття вчені намагалися створити машину, яка приводила в рух робочий вал. Перший повноцінний двигун був розроблений в 1834 році. Його створив російський винахідник Б.С. Якобі. Він вирішив використовувати не зворотно-поступальний вид руху, а обертальний. У його електродвигуні пара магнітів взаємодіяли і провокували обертання валу.