

Лекція № 116

Тема: «Двигуни постійного струму»

ПЛАН

- 1. Принцип дії двигунів постійного струму;*
- 2. Основні рівняння двигунів постійного струму;*
- 3. Пуск у хід двигунів постійного струму;*
- 4. Робочі і механічні характеристики двигунів постійного струму;*
- 5. Регулювання частоти обертання двигунів постійного струму;*
- 6. Електричне гальмування двигунів постійного струму;*
- 7. Втрати і коефіцієнт корисної дії двигуна постійного струму.*

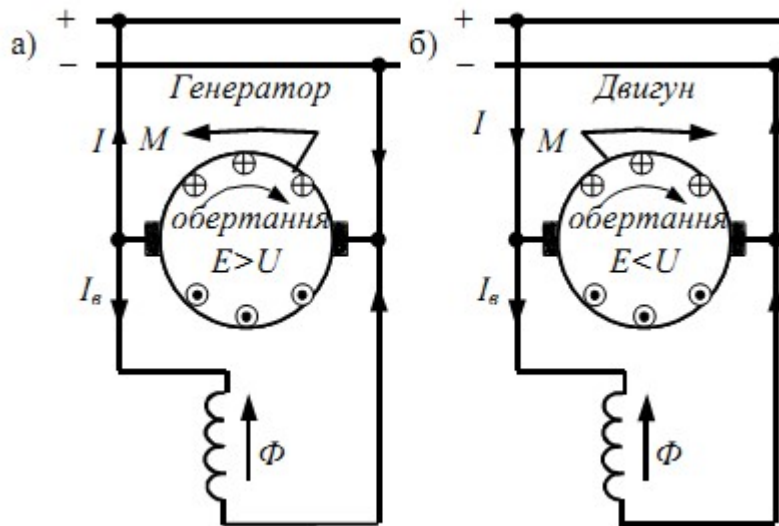
1. Принцип дії двигунів постійного струму

Електричні машини мають властивість оборотності, тобто вони можуть працювати як у режимі генератора, так і в режимі двигуна. Тому якщо машину постійного струму підключити до джерела енергії постійного струму, то в обмотці збудження й в обмотці якоря машини з'являться струми. Взаємодія струму якоря з полем збудження створюють на валу якоря електромагнітний момент M_{em} . Однак тепер цей момент є не гальмівним, як це мало місце в генераторі, а обертовим моментом (рис. 23.1.). Під дією електромагнітного моменту якір машини починає обертатися, тобто машина буде працювати в режимі електричного двигуна, споживаючи з мережі електричну енергію і перетворюючи її в механічну.

В процесі роботи двигуна його якір обертається в магнітному полі. В обмотці якоря індукуються ЕРС E_a , напрямком якої, можна визначити за правилом “правої руки”. По своїй природі ця ЕРС нічим не відрізняється від ЕРС, що наводиться в якірній обмотці генератора. В двигуні вона спрямована проти струму I_a і тому називається зворотною електрорушійною силою якоря (мал. 23.2.).

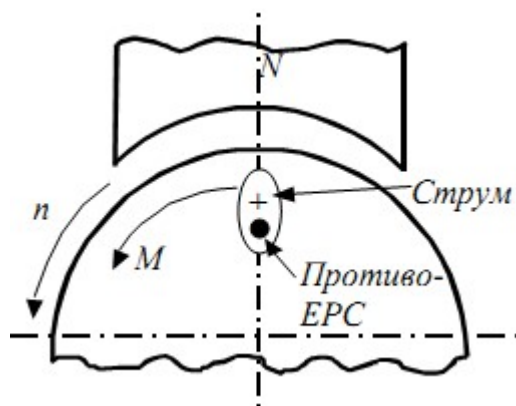
Так само як і генератори, двигуни постійного струму можуть бути незалежного, паралельного, послідовного і змішаного збудження.

Двигуни постійного струму набули широкого застосування в електроприводах, де потрібно плавне й у широких межах регулювання частоти обертання, тому що у відношенні регульовальних властивостей двигуни постійного струму мають безперечні переваги перед двигунами змінного струму.



Мал. 23.1. Машина

паралельного збудження в жимі генератора (а) і в режимі двигуна (б).



Мал. 23.2. Напрямок зворотної ЕРС у двигуні.

2 Основні рівняння двигунів постійного струму

Незалежно від способу збудження для двигунів постійного струму в усталеному режимі роботи під навантаженням справедливі основні рівняння:

1) Рівняння напруг для кола якоря:

$$U = E_a + I_a R_a, \quad (23.1)$$

де U - підведена до двигуна напруга; $E_a = c_e n \Phi$ - ЕРС обмотки якоря; $I_a R_a$ - спад напруги в колі якоря.

2) Струм кола якоря:

$$I_a = (U - E_a) / R_a.$$

3) Частота обертів двигуна (з рівняння 23.1, з огляду на те, що $E_a = c_e n \Phi$)

$$n = (U - I_a R_a) / (c_e \Phi),$$

де Φ - магнітний потік в повітряному зазорі на кожному полюсному поділу.

4) Баланс потужності двигуна:

$$U_a I_a = E_a I_a + I_a^2 R_a$$

5) Електромагнітний момент двигуна визначається залежністю:

$$M_{em} = C_m I_a \Phi, \quad (23.4)$$

де $C_m = PN/2\pi\alpha$ - постійна машини.

Електромагнітний момент M_{em} приводить якір двигуна в обертання, що через вал передається виконавчому механізму. При цьому на вал двигуна діють такі моменти:

- *обертаний* (електромагнітний) момент M_{em} ;
- *момент холостого ходу* M_0 , зумовлений механічними (включаючи вентиляційні) і магнітними втратами в двигуні. Величина моменту M_0 не залежить від навантаження і у двигунах нормального виконання вона не перевищує 2-6 % від номінального значення обертового моменту (M_n);
- *корисний (рушійний) момент* M_2 тобто протидіючий момент механізму, що приводиться в дію даним двигуном;
- *динамічний момент* $M_{дин}$, що виникає при всякій зміні частоти обертів двигуна в зв'язку з інерцією обертових частин двигуна і механізму, що приводиться ним у дію (під дією цього моменту створюється запас кінетичної енергії обертових частин двигуна і механізму):

$$M_{дин} = Jd\omega/dt,$$

де J - момент інерції всіх обертових частин агрегату, приведений до валу двигуна і віднесений до кутової частоти обертання ω .

Як правило моменти M_0 і M_2 розглядають спільно як суму:

$$M_0 + M_2 = M_{ст},$$

де $M_{ст}$ - *статичний момент* опору обертанню двигуна.

У загальному випадку рівняння моментів двигуна:

$$M_{em} = M_0 + M_2 \pm M_{дин},$$

$$\text{або } M_{em} = M_{ст} \pm M_{дин}.$$

Знак “плюс” чи “мінус” у динамічного моменту визначається характером зміни частоти обертання: при збільшенні частоти обертання M_0 додається до

моменту M_{cm} (знак “плюс”), а при зменшенні частоти обертання M_d діє проти моменту M_{cm} (знак “мінус”).

При незмінній частоті обертання якоря ($d\omega/dt = 0$) динамічний момент:

$M_d = 0$, тоді рівняння моментів двигуна:

$$M_{em} = M_0 + M_2 = M_{cm} \quad (23.4)$$

тобто при усталеному режимі роботи обертовий момент двигуна і статичний момент опору на його валу взаємно врівноважуються.

Окрім того, обертовий момент двигуна пропорційний електромагнітній потужності $P_{em} = E_a I_a$, а тому:

$$M_{em} = \frac{P_{em}}{\omega} = \frac{P_{em}}{2\pi n} = \frac{60}{2\pi} \frac{P_{em}}{n} = 9.55 \frac{P_{em}}{n}. \quad (23.5)$$

Величина корисного моменту двигуна пропорційна корисній потужності двигуна, що дає можливість одержати вираз корисного моменту, аналогічний виразу (23.5)

$$M_2 = 9.55 P_2/n, \quad (23.6)$$

де P_2 - корисна потужність двигуна (потужність на валу), Вт; M_2 - корисний момент, Н·м; n - частота обертів, об/хв.

3 Пуск у хід двигунів постійного струму

Пускові властивості двигунів постійного струму, як і двигунів змінного струму, оцінюються такими показниками:

- 1) кратністю пускового струму I_n/I_n ;
- 2) кратністю пускового моменту M_n/M_n ;
- 3) тривалістю пускової операції t_n (с);
- 4) економічністю пускової операції, з погляду витрат на устаткування і наступні експлуатаційні витрати.

Ці показники залежать у першу чергу від способів пуску в хід двигунів. Розглянемо характеристику способів пуску в хід двигунів постійного струму.

Пряме включення в мережу. Цей спосіб пуску простий, не вимагає спеціальної апаратури, однак має той істотний недолік, що в момент вмикання двигуна в мережу відбувається кидок пускового струму.

Цей пусковий струм визначається:

$$I_n = (U - E_a)/R_a, \quad (23.7)$$

де $E_a = c_e n \Phi = 0$, тому що $n = 0$.

Отже:

$$I_n = U/R_a. \quad (23.8)$$

Як правило у двигунів постійного струму опір кола якоря R_a менше 1 Ом , тому пусковий струм у 10 і більше разів перевищує номінальний струм.

Цим способом, як правило, запускаються в хід тільки двигуни малої потужності, у яких опір кола якоря відносно великий.

Реостатний пуск. При цьому способі пуску в момент включення двигуна в мережу в коло якоря включений додатковий опір пускового реостату R_n . При цьому пусковий струм обмежується величиною:

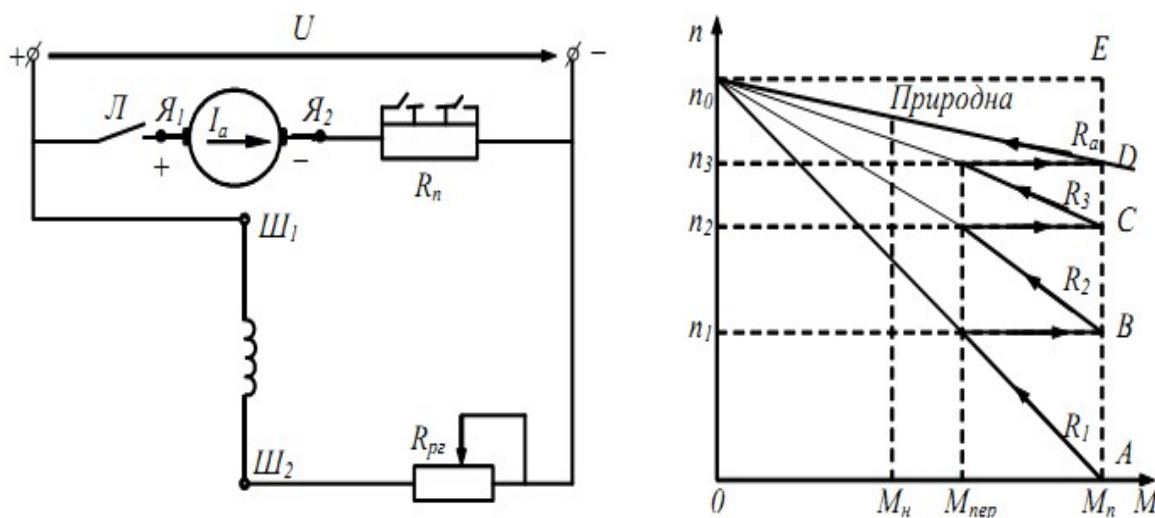
$$I_n = U/(R_a + R_n). \quad (23.9)$$

Величину опору пускового реостата в двигунів постійного струму вибирають таким чином, щоб кратність пускового струму не перевищувала такі величини:

$$I_n/I_n = 1,4 \div 1,7 - \text{для двигунів понад } 1000 \text{ кВт};$$

$$I_n/I_n = 1,7 \div 2,5 - \text{для двигунів до } 1000 \text{ кВт}.$$

Принципова схема цього способу пуску на прикладі двигуна паралельного збудження приведена на мал. 23.3,а.



Мал. 23.3. Принципова схема пуску (а) і побудова графіка пускового моменту (б) двигуна постійного струму паралельного збудження

Вмикання двигуна виконується замиканням лінійного контактора L , при цьому послідовно з колом якоря ввімкнений опір пускового реостата R_n і пусковий

струм обмежується до зазначеної вище кратності. У міру розгону двигуна ступені пускового реостата автоматично шунтуються і, коли пуск завершиться, той опір R_n буде цілком зашунтований. Цей спосіб пуску двигунів постійного струму одержав найбільше поширення.

Пуск при зниженій напрузі. Цей спосіб пуску застосовується в системах Г-Д, у яких двигун живиться від окремого генератора. У таких системах доцільно при включенні двигуна живити його зниженою напругою. При цьому пусковий струм дорівнює: $I_n = U/R_a$ і може бути обмежений будь-якою кратністю.

Оскільки системи Г-Д використовуються тільки в спеціальних установках, цей спосіб пуску двигунів має обмежене застосування.

Пуск в хід двигунів постійного струму послідовного збудження в основному протікає так само, як і паралельного, з тієї, однак, істотною різницею, що двигун послідовного збудження ні в якому випадку не можна пускати вхолосту. Це впливає з властивості його швидкісної характеристики $n = f(I_a)$. Дійсно, в двигуні послідовного збудження струм збудження дорівнює струму в якорі I_a . Але по формулі (23.3) маємо:

$$n = (U - I_a R_a) / (c_e \Phi).$$

При зменшенні навантаження, тобто M_{cm} , одночасно буде зменшуватися струм I_a і потік Φ , а швидкість обертання буде рости. При значному зменшенні навантаження збільшення частоти обертання може перевищити механічно припустимі межі, і двигун може потерпіти аварію (розрив бандажів, псування обмотки і т.д.). Тому двигуни постійного струму послідовного збудження запускають під навантаженням не менш як $0,25P_n$.

4 Робочі і механічні характеристики двигунів постійного струму

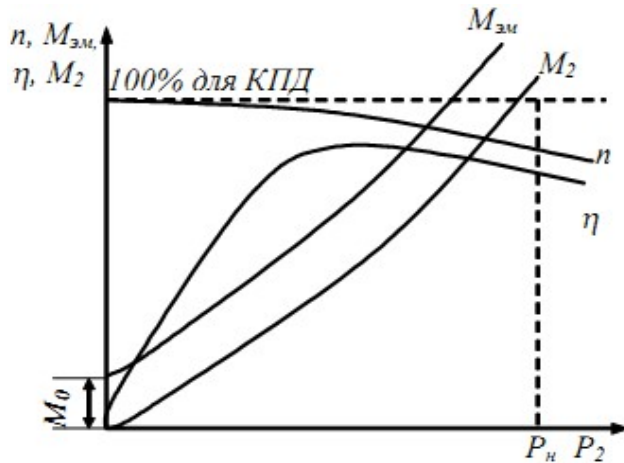
До робочих характеристик двигунів постійного струму відносять залежності: частоти обертання n , електромагнітного моменту M_{em} ККД η від потужності P_2 , що віддається, при $U = U_n = const$.

При знятті робочих характеристик двигуна паралельного збудження напруга $U = U_n = const$, а опір регульовального реостата в колі збудження R_{p2} підбирається так, щоб при номінальній напрузі і номінальному навантаженні двигун обертався з

номінальною частотою обертання. У цьому положенні реостат R_{pe} залишається увесь час при знятті робочих характеристик, тобто $R_{pe} = const$, відповідно чому:

$$I_3 = U / (R_a + R_{pe}) = const.$$

Робочі характеристики двигуна паралельного збудження показані на мал. 23.4. Пояснимо насамперед вигляд швидкісної характеристики. Відповідно до формули (23.3) $n = (U - I_a R_a) / (c_e \Phi)$.



Мад.23.4. Робочі характеристики двигуна паралельного збудження

Тому що величини U і I_3 є постійними, то в цих умовах на частоту обертання двигуна паралельного збудження діють дві причини, а саме:

- 1) омичний спад напруги в обмотці якоря $I_a R_a$;
- 2) реакція якоря.

Зі збільшенням навантаження, тобто струму I_a , перша причина прагне зменшити частоту обертання двигуна, тоді як друга, навпаки, збільшити її, оскільки при звичайних умовах реакція якоря діє розмагнічуючим чином.

Залежно від того, яка з цих двох причин переважає, частота обертання двигуна або зменшиться або збільшиться при збільшенні навантаження. Перший випадок є нормальним: тому швидкісна характеристика двигуна паралельного збудження $n = f(P_2)$, має вигляд майже прямої, слабо нахиленої до осі абсцис, тобто частота обертання двигуна паралельного збудження зі збільшенням навантаження незначно зменшується, як правило на 3-8 % при зміні навантаження від холостого ходу до номінального. Іноді така швидкісна характеристика називається жорсткою.

Маючи на увазі характер залежності $n = f(P_2)$, неважко пояснити характеристику $M_2 = f(P_2)$. Справді, якби частота обертання двигуна n була постійною, то за формулою (23.6) момент M_2 був би прямо пропорційний

потужності P_2 . Графічно така залежність була б показана прямою, що виходить з початку координат. В дійсності частота обертання n зі збільшенням навантаження трохи падає; тому $M_2 = f(P_2)$ трохи відгинається догори.

Момент $M_{em} = M_2 + M_0 = M_{cm}$ [формула (23.4)]. При $I_3 = const$ і $n \approx const$ момент холостого ходу $M_0 \approx const$. Отже, крива $M_{em} = f(P_2)$ проходить вище кривої $M_2 = f(P_2)$ на деяку постійну величину, тобто паралельно цій кривій.

Крива $\eta = f(P_2)$ має типовий характер. Віддача швидко росте при збільшенні навантаження від холостого ходу до $\frac{1}{4}$ номінальної, досягає при $\frac{1}{2}$ навантаження значення, близького до граничного, і потім, у межах зміни навантаження від $\frac{1}{2}$ до номінального, залишається майже постійною. Як правило, в двигунах малої потужності $\eta = 0,85 - 0,94$.

Аналогічні робочі характеристики мають і двигуни *незалежного* збудження.

Швидкісна характеристика двигуна послідовного збудження значно відрізняється від аналогічної характеристики двигуна паралельного збудження (мал. 23.5).

При збільшенні навантаження струм якоря I_a збільшується й одночасно збільшується магнітний потік Φ (у двигуна послідовного збудження $I = I_a = I_3$). Отже, зі збільшенням навантаження, тобто I_a , частота обертання двигуна послідовного збудження сильно падає, причому при менших навантаженнях, коли машина ще не насичена, частота обертання зменшується швидше, а при великих навантаженнях - повільніше.

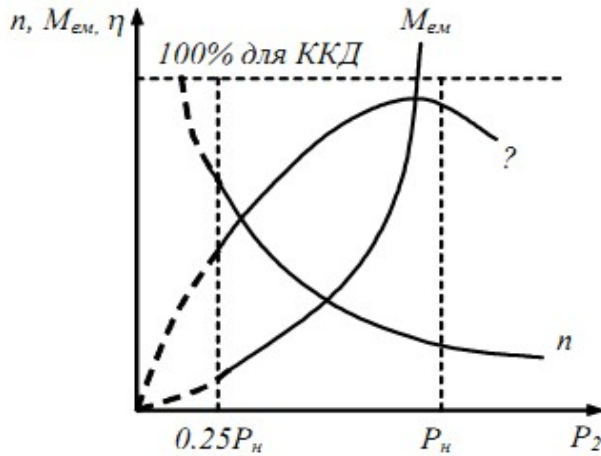
Такий вигляд швидкісної характеристики, яку іноді називають *м'якою*, складає найбільш відмітну властивість двигуна послідовного збудження. В цьому відношенні між двигунами паралельного і послідовного збудження спостерігається значна різниця, що пояснюється тим, що в першому з них потік Φ майже не залежить від навантаження, тобто від струму I_a , а в другому він змінюється залежно від I_a по кривій намагнічування.

Відповідно до швидкісної характеристики двигуна послідовного збудження знаходиться крива його електромагнітного моменту (мал. 23.5)

$$M_{em} = f(P_2) = C_m I_a \Phi.$$

При невеликих навантаженнях, у межах до насичення сталі, $\Phi = I_a$, отже:

$$M_{em} = C'_m I_a^2. \quad (23.10)$$



Мал. 23.5 Робочі характеристики двигуна послідовного збудження

Тобто, крива $M = f(P_2)$ в початковій своїй частині є параболою. Навпаки, при сильному насиченні можна вважати, що потік практично не залежить від I_a , тобто $\Phi \approx const$. У цих умовах $M_{em} \equiv I_a$, тобто момент обертання змінюється майже пропорційно струму, як у двигуна паралельного збудження.

Властивість двигунів послідовного збудження розвивати момент, приблизно пропорційний квадрату струму, має дуже важливе значення особливо в тих випадках, коли потрібний великий пусковий момент (крани, електровози), і там, де необхідна велика (до 300 %) перевантажувальна здатність двигуна.

Треба відзначити характерну різницю між двигунами паралельного і послідовного збудження. Справді, припустимо, що момент двигуна збільшився в два рази. В двигуні паралельного збудження струм I_a повинний буде зрости теж у два рази (тому що $\Phi = const$), відповідно чому приблизно в два рази збільшиться і потужність двигуна при майже незмінній частоті обертання.

У двигуні послідовного збудження (ненасиченому) струм зросте усього в $\sqrt{2}$ рази; у стільки ж разів збільшиться і потужність двигуна, тоді як його частота обертання зменшиться в $\sqrt{2}$ рази.

У відношенні віддачі між обома типами двигунів немає істотної різниці.

У двигунах **змішаного** збудження МРС обмоток паралельного і послідовного збудження вибирається так, що одна з цих обмоток є основною, тобто дає не менш 70 % МРС машини, а інша є додатковою.

Обмотки збудження включають:

а) узгоджено, коли МРС обмоток, маючи один напрямок складаються;

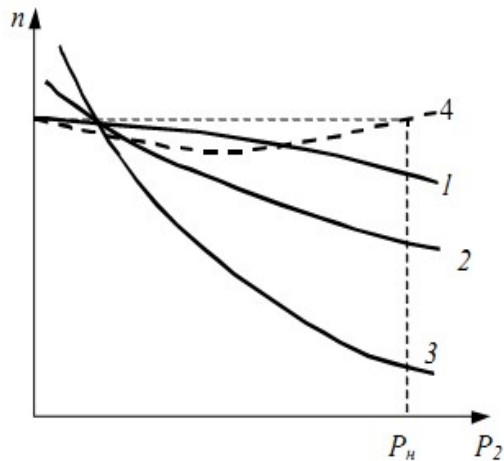
б) зустрічно (неузгоджено), коли МРС обмоток, маючи різний напрямок, віднімаються.

Вважаючи, що машина не насичена і що відповідно додаванню або відніманню МРС паралельної і послідовної обмоток збудження, складаються або віднімаються створювані цими обмотками потоки $\Phi_{ш}$ і Φ_c , маємо:

$$\Phi = \Phi_{ш} \pm \Phi_c; M_{ем} = C_m I_a (\Phi_{ш} \pm \Phi_c).$$

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e (\Phi_{ш} \pm \Phi_c)}$$

При узгодженому включенні обмоток збудження характеристики двигуна змішаного збудження (крива 2 на мал. 23.6) займають проміжне положення між робочими характеристиками паралельного (крива 1) і послідовного (крива 3) двигунів, але ближче до першого.



Мал. 23.6. Швидкісні характеристики двигунів постійного струму при різних способах збудження

При зустрічному включенні обмоток умови роботи двигуна змішаного збудження погіршується. Особливо важкі умови пуску в хід, тому що при великому пусковому струмі двигун може залишитися майже без збудження і не зрушить з місця. Щоб уникнути цього, послідовну обмотку збудження на час пуску закорочують. Зустрічне включення застосовується в тих випадках, коли потрібно одержати досить постійну частоту обертання двигуна (крива 4 на мал. 23.6). Для цього треба підібрати послідовну обмотку так, щоб її дія разом з дією реакції якоря зрівноважили вплив на частоту обертання спад напруги в колі якоря $I_a R_a$.

Механічна характеристика двигуна являє собою залежність частоти обертання від обертового (електромагнітного) моменту на валу, тобто $n = f(M)$ при $I_3 = const$ і $U = const$.

Підставивши в рівняння (23.3) значення струму якоря з виразу для обертового моменту $M = C_m I_a \Phi$, одержимо:

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi} = \frac{U}{C_e \Phi} - M \frac{R_a}{C_e C_m \Phi^2}$$

або

$$n = n_0 - M \frac{R_a}{C_e C_m \Phi^2}$$

де $n_0 = U / (C_e \Phi)$ - частота обертів двигуна при ідеальному холостому ході (коли $M=0$).

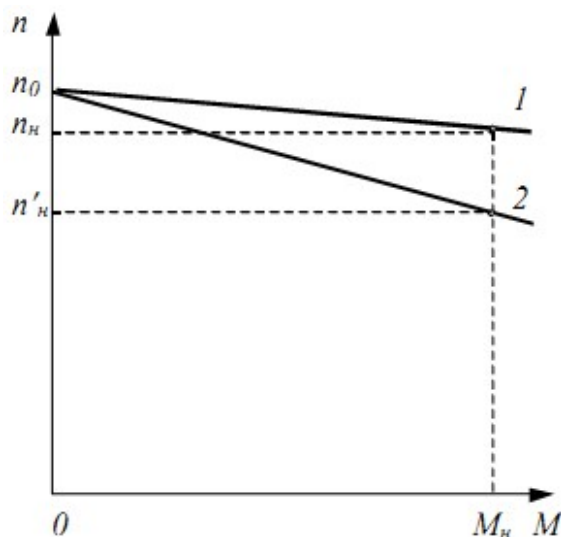
Механічна характеристика двигуна паралельного збудження (мал. 23.7) - жорстка [при номінальному навантаженні зниження частоти обертання не перевищує $(0,05 \div 0,1)n_0$] графік її практично є прямою лінією.

Відповідно до рівняння (23.12) двигун, крім природної механічної характеристики 1 при $R_d = 0$ має ще і штучні (чи реостатні) характеристики, що одержують введенням в коло якоря додаткового опору R_d (характеристика 2 на мал. 23.7).

У двигунів послідовного збудження частота обертання n обернено пропорційна магнітному потоку $\Phi(I)$ машини:

$$n = \frac{U - I_a (R_a + R_3)}{C_e \Phi(I)}, \quad (23.13)$$

де R_3 - опір обмотки збудження.

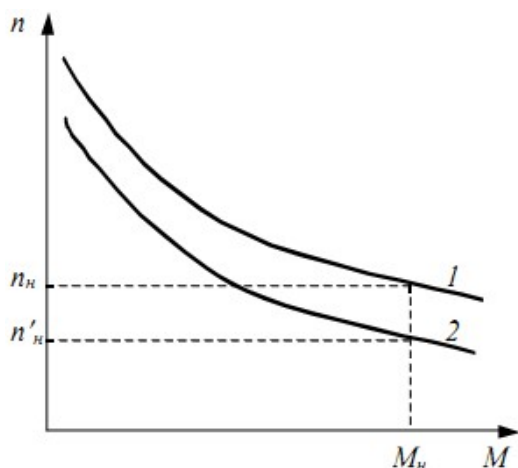


Мал. 23.7. Механічні характеристики двигуна паралельного збудження

Природна механічна характеристика двигуна $n = f(M)$ при $U = const$ графічно зображена на мал. 23.8 (крива 1). У цілому – характеристика м'яка. До насичення магнітопроводу машини магнітний потік пропорційний струму якоря, тобто $\Phi = \alpha I_a$. Отже, обертовий момент якоря $M = C_m I_a \Phi = C_m \alpha I_a^2$. Виразивши звідси значення I_a через M і підставивши його в рівняння (23.12), одержимо:

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R_z)}{C_e \Phi} = \frac{U}{C_e \alpha \sqrt{M / (C_m \alpha)}} - \frac{R_a + R_z}{C_e \alpha} = A / \sqrt{M} - B$$

де A і B - постійні величини.



Мал. 23.8. Механічні характеристики двигуна послідовного збудження

Таким чином, частота обертання двигуна зі збільшенням обертового моменту зменшується за законом, близькому до гіперболічного. Сповільнення спаду природної механічної характеристики в нижній частині, де вона майже паралельна осі M , зумовлено магнітним насиченням магнітопроводу і спадом напруги на якорі $I_a R_a$.

Штучні механічні характеристики двигуна послідовного збудження одержують введенням в коло якоря додаткового опору R_d (крива 2 на мал. 23.8).

5 Регулювання частоти обертання двигунів постійного струму

Регульовальні властивості двигунів визначаються:

а) межами регулювання частоти обертання, що встановлюються відношенням максимальної частоти обертання до мінімальної n_{max}/n_{min} ;

б) економічністю регулювання, (витрати на устаткування і наступні експлуатаційні витрати);

в) характером регулювання - плавним чи східчастим;

г) простотою і надійністю регулюючої апаратури й операцій з регулювання частоти обертання.

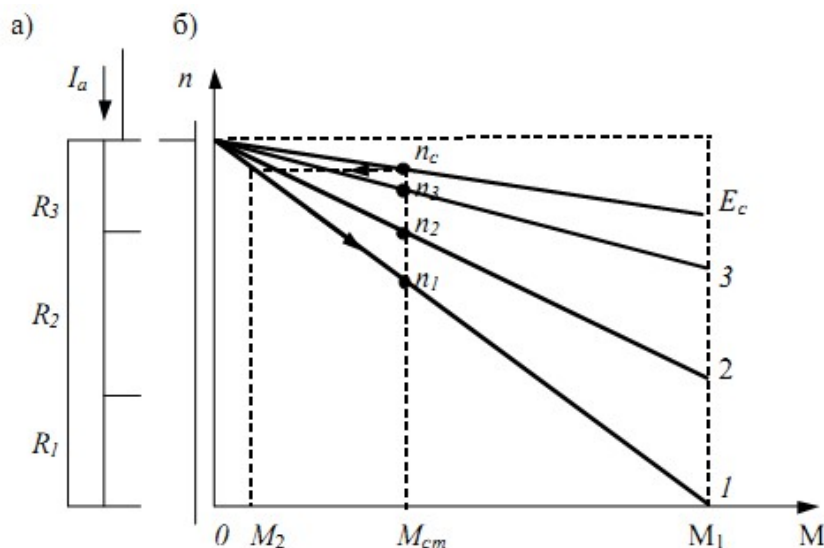
Можливі способи регулювання частоти обертання двигунів очевидні з виразу:

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R_{pr})}{C_e \Phi} \quad (23.14)$$

При живленні двигунів від джерела постійної напруги частоту обертання можна регулювати у такий спосіб:

- зміною опору кола якоря;
- зміною значення магнітного потоку.

Для регулювання частоти обертання шляхом зміни опору кола якоря як правило використовують той же реостат, що і для пуску двигуна. Наприклад, за допомогою реостата мал. 23.9, а, для якого на мал. 23.9, б, зображені механічні характеристики при моменті $M = M_{cm}$, можна одержати частоти обертання n_1, n_2, n_3, n_4 . У тому випадку, коли необхідно мати інші частоти обертання, реостат обладнують додатковими ступенями опорів. Реостат, використаний як для пуску, так і для регулювання частоти обертання, знаходиться у відношенні нагрівання в більш важких умовах, ніж реостат, який служить тільки для пуску.



Мал. 23.9. Схема регулювального реостата (а) і механічні характеристики (б) двигуна паралельного збудження.

При зміні опору в колі якоря відбувається наступне. Допустимо, що двигун паралельного (послідовного, змішаного) збудження працює на природній характеристиці з моментом $M = M_{cm}$ і частотою обертання n_c (див. мал. 23.9). В

першу мить після включення в коло якоря реостата з опором $R = R_1 + R_2 + R_3$ через інерційність двигуна частота обертання не змінюється.

Збільшення опору при незмінній частоті обертання призводить до зменшення струму якоря і моменту двигуна. При частоті обертання n_c двигун перейде на характеристику I і буде розвивати момент M_2 . Оскільки, $M_2 < M_{cm}$, то почнеться перехідний процес, при якому частота обертання двигуна буде знижуватися. Це викликає зменшення ЕРС, а отже, збільшення струму якоря і моменту руху двигуна. Усталеним режим настає при частоті обертання n_1 , при якій $M = M_{cm}$.

Розглянутий спосіб регулювання частоти обертання не вимагає складного устаткування і дає можливість одержати знижену частоту обертання при заданому навантаженні. Однак він має істотні недоліки. Одним з них є «м'які» штучні механічні характеристики, завдяки чому частота обертання при даному опорі сильно залежить від навантаження двигуна. «М'які» характеристики утрудняють одержання необхідних, особливо низьких частот обертання при різних навантаженнях. Інший недолік полягає в тому, що регулювання частоти обертання супроводжується втратами потужності в реостаті, що зростають в міру збільшення опору R і зниження частоти обертання.

Регулювання частоти обертання двигуна постійного струму зміною магнітного потоку. Для регулювання частоти обертання двигунів паралельного і змішаного збудження шляхом зміни магнітного потоку в коло шунтової обмотки включають реостат R_{p2} . Зміна опору останнього приводить до зміни струму I_3 і, отже, магнітного потоку.

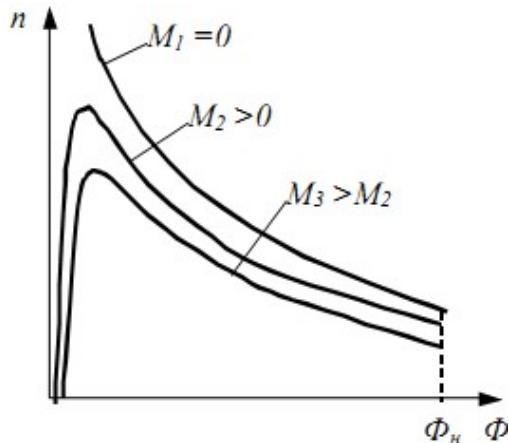
Розглянемо більш докладно даний метод для двигуна паралельного збудження. Залежність між частотою обертання і магнітним потоком при $M = const$ визначається рівнянням (23.12).

Щоб можна було скласти уявлення про характер зміни частоти обертання, на мал. 23.10 приведені залежності $n = f(\Phi)$.

Як видно, при роботі двигуна вхолосту ($M_1 = M_{cm1} = 0$) зі зменшенням магнітного потоку частота обертання зростає і при $\Phi \rightarrow 0$, $n \rightarrow \infty$. Якщо ж двигун навантажений ($M = M_{cm} \neq 0$), то при зменшенні магнітного потоку частота обертання спочатку зростає, а потім, досягнувши максимального значення, зменшується. Та сама

частота обертання у випадку ($M = M_{cm} \neq 0$) може бути отримана при двох різних значеннях магнітного потоку. Однак робочою областю, у якій виконується регулювання частоти обертання, є область, що відповідає великим магнітним потокам, де зі зменшенням потоку частота обертання зростає.

На підставі виразу $M = C_m \Phi I_a$ можна також зробити важливий висновок про те, що при $M = M_{cm} = const$ і зменшенні магнітного потоку струм I_a зростає. Це необхідно враховувати при виборі потужності двигуна.

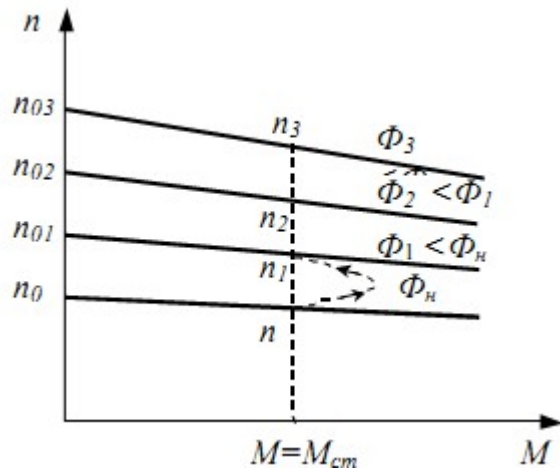


Мал.23.10. Залежності $n = f(\Phi)$ двигуна паралельного збудження при різних моментах

З рівняння (23.12) випливає, що механічні характеристики двигуна паралельного збудження $n = f(M)$ при різних значеннях магнітного потоку прямо-лінійні; меншим значенням магнітних потоків відповідають великі частоти обертання і більш «м'які» механічні характеристики (мал. 23.11). Наприклад, установивши Φ_1, Φ_2, Φ_3 , одержимо при моменті опору M_{cm} частоти обертання n_1, n_2 і n_3 .

Перехід від однієї механічної характеристики до іншої відбувається не при постійній частоті обертання, а відповідно до так званої динамічної характеристики $n = f(m)$, показаної на мал. 23.11 пунктиром. Це пояснюється значною індуктивністю обмотки збудження, через яку зміна магнітного потоку відбувається не миттєво, а поступово, одночасно зі збільшенням частоти обертання.

Однією з переваг розглянутого способу регулювання частоти обертання є його економічність, тому що додаткові втрати потужності в регулювальному реостаті R_{pe} невеликі. До переваг варто віднести також досить «жорсткі» механічні характеристики, що полегшує одержання потрібних частот обертання при різних навантаженнях.



Мал. 23.11. Механічні характеристики двигуна паралельного збудження при різних магнітних потоках

Істотним недоліком варто вважати те, що регулювання частоти обертання шляхом зміни магнітного потоку можна робити лише в області вищій від природної механічної характеристики.

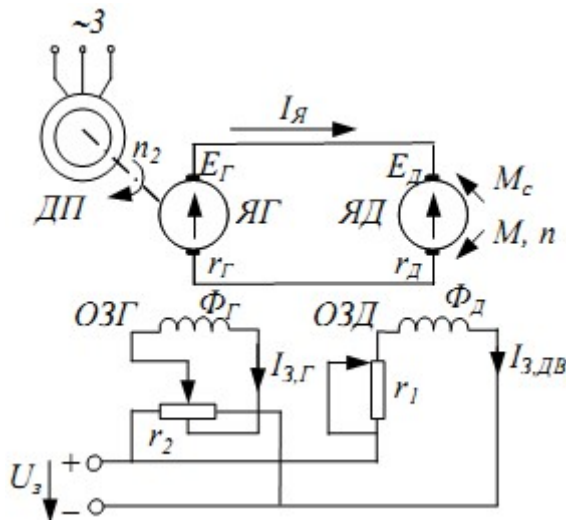
Регулювання частоти обертання двигунів постійного струму зміною підведеної напруги. Як було відзначено вище, серйозним недоліком регулювання частоти обертання шляхом зміни опору в колі якоря при звичайних схемах включення двигунів є складність одержання при різних навантаженнях знижених частот обертання через надто «м'які» механічні характеристики. Для усунення цього недоліку знаходять застосування різні інші способи одержання штучних механічних характеристик, що відрізняються більшою «жорсткістю».

У випадках особливо високих вимог до «жорсткості» механічних характеристик знаходять застосування різні варіанти систем з регульованою напругою, що підводиться до якоря двигуна..

Найпростіша схема одного з варіантів такої системи (системи генератор - двигун, Г-Д) приведена на мал. 23.12. В цій системі якір двигуна ЯД незалежного збудження з'єднаний з якорем генератора ЯГ незалежного збудження, що приводиться в обертання приводним двигуном ДП. Обмотки збудження двигуна ОЗД і генератора ОЗГ одержують живлення від стороннього джерела постійного струму через реостат r_1 і потенціометр r_2 .

Перед пуском двигуна необхідно установити движки реостата r_1 і потенціометра r_2 в положення, зазначені на мал. 23.12, і зробити пуск двигуна ДП. При цьому МРС обмотки ОЗД створює найбільший магнітний потік Φ_0 двигуна, а

магнітний потік Φ_2 , генератора і, отже, його ЕРС E_2 дорівнюють нулю. Очевидно, при цьому якір двигуна $ЯД$ залишиться в спокої.



Мал. 23.12. Схема найпростішої системи генератор-двигун

Для пуску двигуна варто перемістити движок потенціометра r_2 з зазначеного положення, наприклад, уліво. Тоді виникає струм $I_{3.2}$ МРС обмотки $ОЗГ$ створює магнітний потік Φ_2 генератора, з'являються ЕРС E_2 і струм $I_я$. Завдяки взаємодії струму $I_я$ і магнітного потоку $\Phi_д$ двигуна якір останнього $ЯД$ приходить в обертання.

Рівняння механічної характеристики $n = f(M)$ двигуна в системі Г-Д виводиться аналогічно рівнянню (23.12) має вигляд:

$$n = \frac{E_Г}{c_{ед} \Phi_Д} - \frac{M(r_Г + r_Д)}{c_{ед} c_{мд} \Phi_Д^2} = n_0 - \Delta n \quad (23.15)$$

Як видно, механічна характеристика $n = f(M)$ являє собою пряму лінію. Внаслідок невеликого сумарного опору $r_Г + r_Д$ механічна характеристика виходить досить жорсткою.

Регулювання частоти обертання двигуна можна робити двома способами:

- 1) зміною ЕРС генератора $E_Г$ при $\Phi_Д = const$;
- 2) зміною магнітного потоку $\Phi_Д$ двигуна при $E_Г = const$.

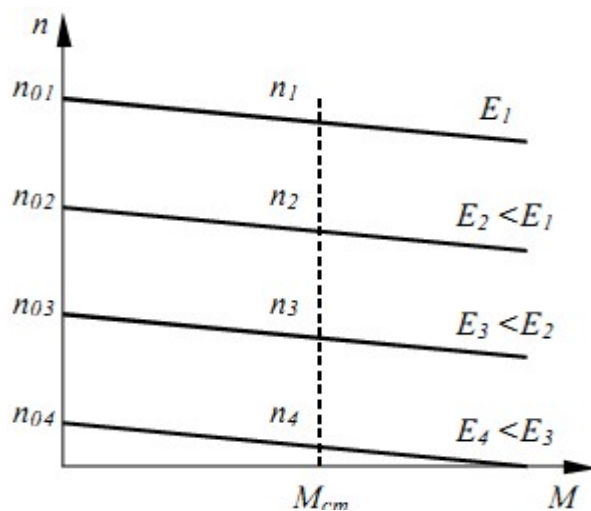
Другий спосіб регулювання частоти обертання був розглянутий раніше, тому зупинимося тільки на першому способі.

З (23.15) випливає, що при зменшенні ЕРС генератора за допомогою потенціометра r_2 буде змінюватися тільки перший член рівняння, що визначає частоту обертання холостого ходу n_0 . Другий член рівняння Δn , яким визначається

зміна частоти обертання, викликана навантаженням, буде залишатися незмінним. Таким чином, механічні характеристики при різних значеннях ЕРС генератора являють собою сімейство паралельних ліній (мал. 23.13) і, наприклад, при моменті M_{cm} виявляється можливим одержати частоти обертання n_1, n_2, n_3, n_4 .

Крім широкого діапазону регулювання частоти обертання система Г-Д має ряд інших переваг. Одна з них полягає в тому, що керування двигуном здійснюється шляхом впливу на коло обмоток збудження, потужності яких відносно невеликі.

До основних недоліків системи Г-Д варто віднести велике число машин, порівняно низький ККД, значні габаритні розміри і високу вартість.



Мал. 23.13. Механічні характеристики двигуна в системі генератор-двигун

З розвитком напівпровідникової техніки виявилось можливим позбутися від недоліків, властивій системі Г-Д, шляхом використання замість генератора з приводним двигуном напівпровідникового (тиристорного) перетворювача змінного струму в постійний з регульованою напругою. В системах з тиристорним перетворювачем можна одержати характеристики, аналогічні характеристикам систем Г-Д.

В даний час уже працює велике число систем з тиристорними перетворювачами на різні потужності й у різних областях техніки. Їхнє число буде надалі збільшуватися.

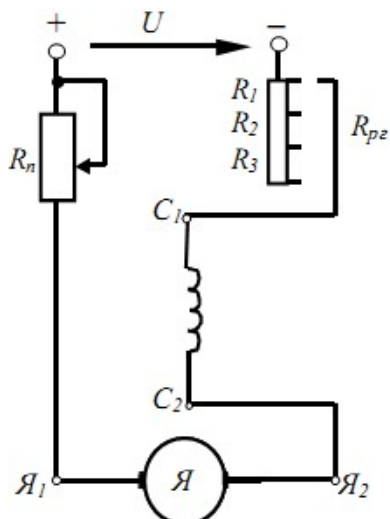
5.1 Регулювання частоти обертання двигунів послідовного збудження.

Воно здійснюється тими ж двома способами, що і двигуна паралельного збудження:

- а) зміною омичного спаду напруги в колі якоря;
- б) зміною потоку збудження.

Регулювання частоти обертання реостатом в колі якоря при $U = const$, $M_{cm} = const$. Переведемо рухомий контакт регулювального реостата з першого положення ($R_{p2} = 0$) на друге (мал. 23.14). Щоб відповісти на запитання, як змінюється струм I_a , припустимо, що сталь машини не насичена. Тоді $\Phi \equiv I_a$ і $U = C_e n \Phi + I_a(R_a + R_{p2}) = C_e n I_a + I_a(R_a + R_{p2})$, звідси:

$$I_a = \frac{U}{C_e n + (R_a + R_{p2})} \quad (23.16)$$

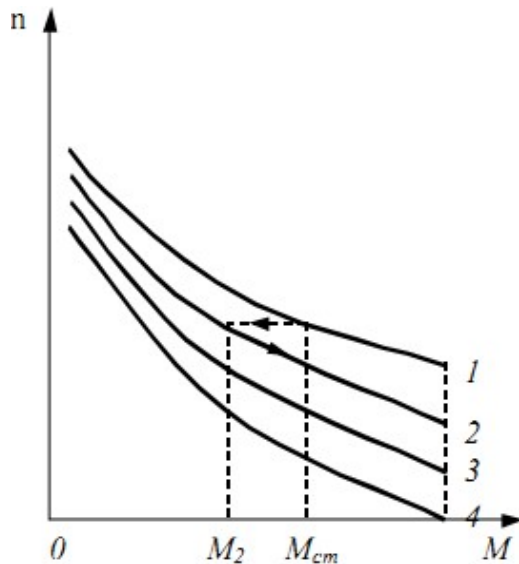


Мал. 23.14. Схема двигуна послідовного збудження.

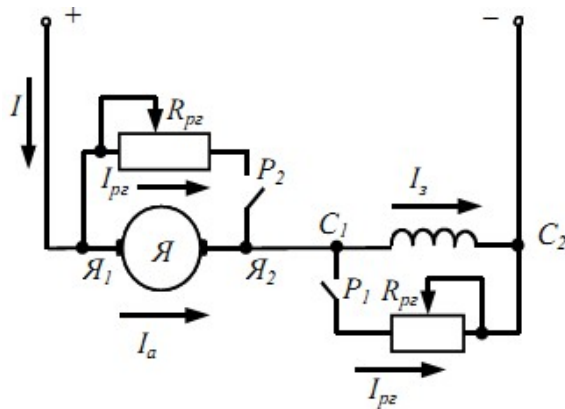
Оскільки, $U = const$ і в перший момент після введення реостата R_{p2} частота обертання двигуна n ще зберігає своє колишнє значення, то I_a зменшується відповідно до збільшення знаменника в формулі (23.16). Обертовий момент двигуна зменшується пропорційно I_a^2 , а оскільки $M_{cm} = const$, то частота обертання двигуна почне зменшуватися, і цей процес буде йти доти, поки струм I_a і відповідно потік Φ не досягнуть своїх колишніх значень (мал. 23.15).

Регулювання частоти обертання двигуна постійного струму послідовного збудження шунтуванням обмотки збудження. Схема регулювання приведена на Мал. 23.16. Припустимо, що $U = const$ і $M_{cm} = const$. При розімкнутих рубильниках $P_1 P_2$ струми в якорі і в послідовній обмотці збудження рівні, тобто $I_{a1} = I_{32}$. Після замикання рубильника P_1 встановлюється новий режим роботи, при якому струм $I_{32} < I_{31}$, тому що частина струму відгалужується в опір R_{p2} . Відповідно до цього зменшується потік збудження від значення Φ_1 до значення Φ_2 . Але струм $I_{a2} = I_{31} + I_{p2}$ повинен бути більше первісного I_{a1} в такій ступені, щоб збереглася рівність:

$$C_m I_{a2} \Phi_2 = C_m I_{a1} \Phi_1 = M_{cm}.$$



Мал. 23.15. Механічні характеристики двигуна послідовного збудження



Мал. 23.16. Схема для регулювання частоти обертання двигуна послідовного збудження шунтуванням обмотки збудження і якоря

Потужності $P_1 = UI_a$ та $P_2 = M2\pi n/60$ збільшуються, внаслідок чого віддача двигуна мало змінюється. Отже, даний спосіб регулювання частоти обертання двигуна досить економічний. Але умови роботи якоря у відношенні нагрівання і комутації погіршуються. Тому зі збільшенням частоти обертання n як правило не йдуть вище 25-35 % від номінальної. Розглянутий спосіб регулювання широко застосовується в електричній тязі.

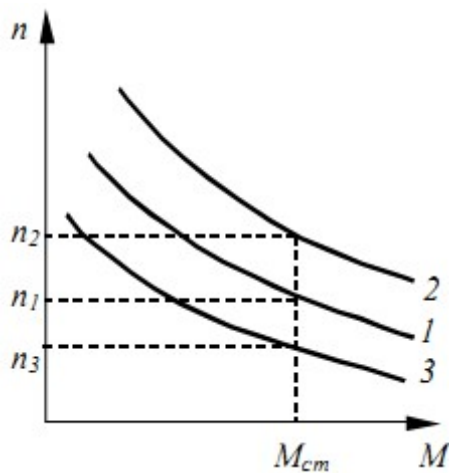
Регулювання частоти обертання двигуна послідовного збудження шунтуванням обмотки якоря. Порівняно з попереднім випадком процес змінюється на зворотний, а саме, при новому усталеному режимі роботи після замикання рубильника P_2 при розімкненому рубильнику P_1 (мал. 23.16) струм $I_{a2} < I_{a1}$, тому що частина струму, що тече з мережі, відгалужується в опір $R_{пр}$; I_{z2} буде більше I_{z1} , так, щоб збереглася рівність $C_M I_{a2} \Phi_2 = C_M I_{a1} \Phi_1 = M_{ст}$. Відповідно, потужність, що підводиться $P_1 = UI_{a2}$ збільшується, а потужність, що віддається $P_2 = M2\pi n/60$

зменшується і, отже, віддача двигуна $\eta = P_2/P_1$ сильно зменшується.

Звідси випливає, що даний спосіб регулювання частоти обертання двигунів послідовного збудження вкрай неекономічний. Тому він застосовується тільки там, де вартість електроенергії не є істотним чинником і де (наприклад, у ливарних цехах) потрібно на короткий час зменшити частоту обертання n .

На мал. 23.17 показані механічні характеристики двигунів послідовного збудження $n = f(M)$ при $U = const$ для випадків:

- а) нормальної роботи двигунів (крива 1);
- б) при шунтуванні обмотки збудження (крива 2);
- в) при шунтуванні обмотки якоря (крива 3).



Мал. 23.17. Механічні характеристики двигуна послідовного збудження

6 Електричне гальмування двигунів постійного струму

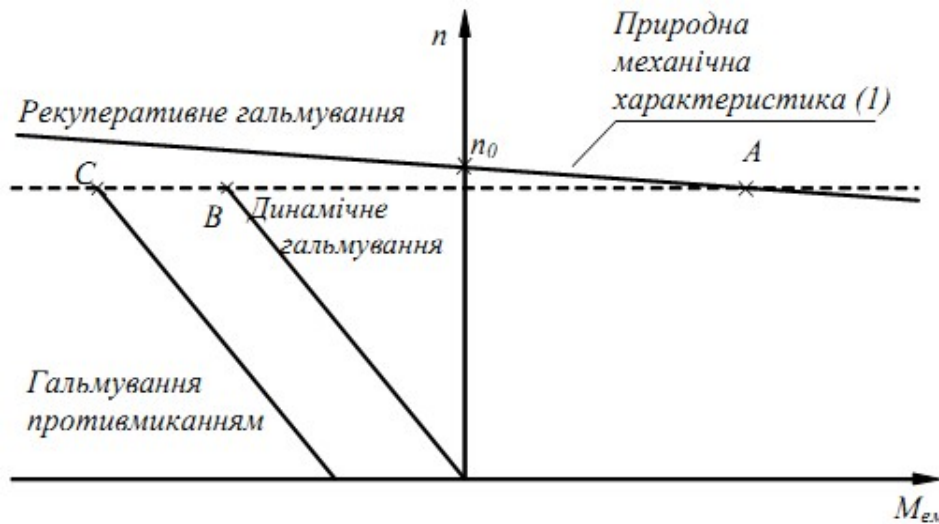
У тому випадку, коли електропривод необхідно зупинити, його відключають від мережі, а потім може застосовуватися механічне гальмування. Однак, широке застосування одержало й електричне гальмування приводу.

Розрізняють такі способи електричного гальмування двигунів постійного струму:

- 1) рекуперативне гальмування (з поверненням енергії в мережу);
- 2) динамічне гальмування;
- 3) гальмування противмиканням.

Характеристику цих способів гальмування розглянемо на прикладі двигуна з паралельним збудженням.

Рекуперативне гальмування. Нехай двигун спочатку працював на природній механічній характеристиці в точці A . Якщо надалі навантаження двигуна зменшується, то його частота обертання буде збільшуватися відповідно до механічної характеристики I . При холостому ході частота обертання двигуна стане рівною n_0 .



Мал. 23.18. Способи електричного гальмування двигунів постійного струму

Якщо ж навантаження має характер потяга, що рухається з ухилу, то двигун може бути розігнаний до швидкості $n > n_0$. При цьому він перейде в режим рекуперативного гальмування, тобто стане генератором і буде віддавати енергію в мережу. Характеристика рекуперативного гальмування є продовження характеристики I в другий квадрат. Відповідно до цієї характеристики момент на валу машини стане негативним, тобто гальмівним стосовно моменту навантаження.

Усталеною частота обертів при цьому встановиться в точці, коли наступить рівновага між обертовим моментом навантаження і гальмівним моментом двигуна.

Динамічне гальмування. При цьому способі гальмування, двигун відключається від мережі живлення і включається на деякий додатковий опір $R_{дод}$. При цьому струм якоря визначається залежністю:

$$I_a = -E_a / (R_a + R_{дод}) \quad (23.17)$$

З приведенного виразу очевидно, що напрямок струму в якорі зміниться на протилежний, а, отже, момент на валу машини змінить свій знак.

Якщо двигун працював спочатку в точці A , то характеристика динамічного гальмування бере свій початок від точки B , що розташована на прямій, що проходить через точку A паралельно осі абсцис. Положення точки B залежить від

значення $R_{\text{дод}}$, що включається в коло якоря.

Для ефективного динамічного гальмування обмотка збудження двигуна включається за схемою незалежного живлення.

Гальмування проти вмиканням. Цей спосіб гальмування застосовується при екстреній зупинці двигуна.

Двигун відключається від мережі живлення, а потім включається з протилежною полярністю затискачів обмотки якоря.

Якщо спочатку двигун працював у точці A , то характеристика гальмування противмиканням бере свій початок від деякої точки C , що розташована на прямій, що проходить через точку A і паралельно осі абсцис. Для обмеження струму якоря необхідно в коло якоря включити додатковий опір, що визначає положення точки C .

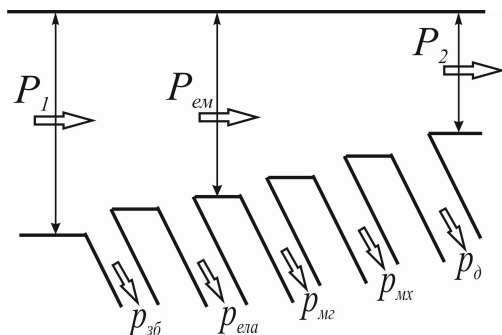
Після зупинки двигуна $n=0$, його необхідно відключити від мережі живлення, оскільки він почне обертатися у протилежному напрямку.

7. Втрати і коефіцієнт корисної дії двигуна постійного струму

Енергетична діаграма двигуна паралельного збудження зображена на мал. 10.1. Первинна потужність P_1 є електричною та споживається з мережі живлення. За рахунок цієї потужності покриваються втрати на збудження $p_{зб}$ і електричні втрати $p_{ел}$ в колі якоря, а частина, що залишилася становить електромагнітну потужність якоря $P_{ем} = E_a I_a$ яка перетворюється в механічну потужність $P_{мх}$. Втрати магнітні $p_{мг}$, додаткові p_{δ} і механічні $p_{мх}$ долаються за рахунок механічної потужності $P_{мх}$, а інша частина цієї потужності є корисною механічною потужністю P_2 на валу двигуна.

Якщо двигун паралельного збудження працює в режимі ХХ, то він споживає з мережі потужність:

$$P_{10} = UI_{a0} + U_3 I_3 = p_{мг} + p_{мх} + I_{a0}^2 \Sigma r + \Delta U_{щ} I_{a0} + U_3 I_3. \quad (29.25)$$



Енергетична діаграма двигуна незалежного збудження

Проте зважаючи на невелике значення струму I_{a0} електричні втрати $I_{a0}^2 \Sigma r$ та $\Delta U_{\text{щ}} I_{a0}$ дуже малі і зазвичай не перевищують 3% втрат $p_0 = p_{\text{мг}} + p_{\text{мх}}$ тому, не допускаючи помітної похибки, можна записати $P_{10} = UI_{a0} + U_3 I_3 = P_0 + U_3 I_3$, звідки втрати ХХ:

$$P_0 = P_{10} - U_3 I_3. \quad (29.26)$$

Аналогічні енергетичні діаграми, що ілюструють перетворення енергії в двигуні, можна побудувати і для інших типів двигунів.

Потужність на вході машини постійного струму (підведена потужність):

- для двигуна (електрична потужність)

$$P_{1\text{дв}} = UI.$$

Потужність на виході машини (корисна потужність):

- для двигуна (механічна потужність)

$$P_{2\text{дв}} = M_2 \omega.$$

Тут M_2 – момент на валу електричної машини.

Коефіцієнт корисної дії електричної машини являє собою відношення корисної потужності P_2 до підведеної P_1 :

$$\eta = P_2/P_1.$$

Сумарна втрата потужності:

$$\Sigma p = p_{\text{мх}} + p_{\text{мг}} + p_{\text{д}} + p_{\text{ела}} + p_{\text{елз}} + p_{\text{елщ}}.$$

К. к. д. ДПС можна вирахувати:

$$\eta = P_2/P_1 = (UI - \Sigma p)/(UI).$$

Звичайно к. к. д. МПС становить 0,75-0,90 для машин потужністю від 1 до 100 кВт та 0,90-0,97 для машин потужністю понад 100 кВт. К. к. д. набагато менший для МПС малої потужності. Наприклад для машин потужністю від 5 до 50 Вт - 0,15-0,50. Вказані значення к. к. д. відповідають номінальному навантаженню машин. Залежність к. к. д. МПС від навантаження виражається графіком $\eta = f(P_2)$ форма якого характерна для електричних машин.

Рівняння обертових моментів ДПС. Електромагнітний момент двигуна:

$$M_{\text{ем}} = P_{\text{ем}}/\omega.$$

який є рушійним і діє в бік обертання, витрачається на зрівноважування гальмівних моментів: 1) моменту M_0 що відповідає втратам: магнітним $p_{\text{мг}}$, додатковим $p_{\text{д}}$ і

механічним p_{mx} що долаються за рахунок механічної потужності P_{mx} ; 2) M_6 - моменту навантаження на валу, створюваного робочою машиною або механізмом; 3) $M_{дин}$ - динамічного моменту. При цьому:

$$M_6 = P_2 / \omega.$$

Таким чином:

$$M_{ем} = M_0 + M_6 + M_{дин}$$

або $M_{ем} = M_{ст} + M_{дин}$,

де $M_{ст} = M_0 + M_6$

є статичним моментом опору.

При усталеному режимі роботи, коли $n = const$ і тому $M_{дин} = 0$

$$M_{ем} = M_{ст} \quad (10-3)$$

Надалі індекс «ем» у $M_{ем}$ будемо опускати. Зазвичай M_0 малий порівняно з M_6 , і тому приблизно можна вважати, що при усталеному режимі роботи $M_{ем} = M$ є корисним моментом на валу і врівноважується моментом M_6 . Можна також величину M_0 включити у величину M_n .

Контрольні запитання:

1. Принципові електричні схеми двигунів паралельного, послідовного і змішаного збудження. Призначення елементів схеми.
2. Основні рівняння двигуна і зміст величин, що туди входять.
3. Які способи обмеження пускового струму застосовуються в двигунах постійного струму?
4. З якою метою при пуску двигуна паралельного збудження опір реостата в колі збудження встановлюють мінімальним?
5. Порівняння робочих характеристик двигунів паралельного і послідовного збудження
6. Порівняння механічних характеристик двигунів паралельного і послідовного збудження.
7. Порівняйте двигуни паралельного і послідовного збудження по їхніх регульовальних властивостях.

Література:

1. Електричні машини. Навчальний посібник / Г.Г. Півняк, Ф.П. Шкрабець, В.П. Довгань. - Дніпропетровськ, Видавництво Національного гірничого університету, 2003, - с.
2. Грабко В.В., Розводюк М.П., Грабенко І.В. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина І. Машини постійного струму. Навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2005. - 86 с.