

**Лекція №5**  
(частина 1)  
**ДВИГУНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

**План лекції:**

1. Область застосування та класифікація двигунів постійного струму (ДПС).
2. Принцип дії та основні рівняння двигунів постійного струму.
3. Пуск і регулювання частоти обертання двигунів постійного струму.
4. Характеристики ДПС.
5. Режими роботи машини постійного струму.

**1 Область застосування та класифікація двигунів постійного струму (ДПС)**

Незважаючи на конструктивну складність двигунів постійного струму в порівнянні з двигунами змінного струму, вони досить широко використовуються в металургійній промисловості, у верстатобудуванні, на транспорті, в системах автоматичного регулювання – скрізь, де необхідно, за умовами виробництва, в значних межах регулювати частоту обертання.

Це пояснюється тим, що такі двигуни мають кращі експлуатаційні характеристики у відношенні регулювання частоти обертання, пуску, зміни напрямку обертання (**реверсування**), а також допускають більш значні перевантаження в порівнянні з двигунами змінного струму.

Широкі межі використання двигунів постійного струму зумовили значний діапазон номінальних потужностей цих двигунів, що становить від кількох ват, в дитячих іграшках, до тисяч кіловат в електроприводах прокатних станів.

Номінальною потужністю двигуна  $P_{ном}$  є механічна потужність на валу. Ця потужність зазначається в паспортних даних разом з номінальною напругою  $U_{ном}$ , номінальним струмом  $I_{ном}$  та номінальною частотою обертання  $n_{ном}$ .

Класифікуються двигуни постійного струму, як і генератори, за способом збудження і поділяються на двигуни магнітоелектричного

та електромагнітного збудження (рисунок 3.5, лекція 3; рисунок 4.1, лекція 4). Слід зазначити, що на відміну від генераторів, двигуни незалежного і паралельного збудження можна було б розглядати як один тип двигуна, адже нераціонально мати окремі джерела живлення для обмоток збудження та якоря, але в системах регулювання зі зміною напруги в колі якоря, обмотка збудження завжди живиться від незалежного джерела.

Характер збудження двигуна суттєво впливає на характеристики двигуна, а отже, і на сферу його використання. Так двигуни магнітоелектричного збудження, магнітний потік яких створюється постійними магнітами, використовуються, як малопотужні двигуни, в системах автоматики, обчислювальної техніки, а також, в дитячих іграшках та як двигуни середньої потужності в системах з плавним регулюванням швидкості потужністю до 30 кВт. Двигуни послідовного збудження застосовуються як потужні тягові двигуни, в електротранспорті, в приводах металургії тощо. Двигуни паралельного збудження використовуються на електростанціях для приводу механізмів, що потребують широкого і плавного регулювання частоти обертання, а також, для приводу деяких особливо відповідальних резервних механізмів незначної потужності.

## **2 Принцип дії та основні рівняння двигунів постійного струму**

Машини постійного струму мають властивість зворотності, 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 і в обмотці якоря машини з'являться струми. Взаємодія струму якоря з полем збудження створює на якорі електромагнітний момент  $M_{em}$ , що є не гальмівним, як це мало місце в генераторі, а є **обертовим**.

Під дією електромагнітного моменту якоря машина почне обертатися, тобто машина буде працювати в режимі двигуна, споживаючи з мережі електричну енергію і перетворюючи її в механічну.

Для двигунів, як і для генераторів постійного струму, складаються рівняння струмів, ЕРС, моментів та балансу потужностей.

**Рівняння струмів**, згідно з **першим законом (правилом) Кірхгофа**, складаються для двигунів паралельного та змішаного збудження.

Двигун з послідовним збудженням має однакові струми в обмотках якоря і збудження

$$I = I_a = I_{зб}, \quad (5.1)$$

де  $I$  – струм навантаження, тобто струм, що споживається з мережі, А;  
 $I_a, I_{зб}$  – струми обмоток якоря та збудження відповідно, А.

Рівняння струмів двигунів паралельного і змішаного збудження аналогічні

$$I = I_a = I_{зб},$$

та

$$I = I_a = I_{зб.пар}, \quad (5.2)$$

де  $I_{зб.пар}$  – струм збудження паралельної обмотки збудження, А.

Як відомо, при обертанні якоря в магнітному полі в його обмотці буде створюватись ЕРС  $E_a$ . Легко переконатись, скориставшись правилом правої руки, що направлена вона назустріч струму якоря  $I_a$ , тому її ще називають протиелектрорушійна сила (**проти-ЕРС**) (див. п.3, лекція 2). Отже, за **другим законом (правилом) Кірхгофа** для контуру «мережа – обмотка якоря» маємо

$$U - E_a = I_a \cdot \Sigma R_i, \quad (5.3)$$

де  $U$  – напруга мережі, прикладена до обмотки якоря, В;  
 $\Sigma R_i$  – визначається за (4.8) (лекція 8), як і у генератора, електричний опір всіх послідовно ввімкнених в коло якоря елементів, включаючи опір контакту «щітка – колектор», Ом.

Вираз (5.3) представляється, як правило, у наступному вигляді

$$U = E_a + I_a \cdot \Sigma R_i, \quad (5.4)$$

який і є **рівнянням ЕРС (напруги)** двигуна постійного струму, незалежно від способу його збудження.

Помноживши праву та ліву частини рівняння ЕРС (5.4) на струм якоря  $I_a$ , отримаємо

$$U \cdot I_a = E_a \cdot I_a + I_a^2 \cdot \Sigma R_i, \quad (5.5)$$

де  $U \cdot I_a$  – електрична потужність, що підводиться до обмотки якоря з мережі;

$E_a \cdot I_a$  – електромагнітна потужність, що чисельно рівна сумарній механічній потужності, яка створюється в двигуні згідно (4.11) (лекція 4)  $E_a \cdot I_a = M_{em} \cdot \omega$ ;

$I_a^2 \cdot \Sigma R_i$  – електричні втрати в елементах двигуна, що ввімкнені в коло якоря, в тому числі, і втрати в контакті «щітка – колектор».

Електромагнітний момент  $M_{em}$ , що створюється в двигуні, на відміну від аналогічного моменту в генераторі, є **обертовим** – саме він обертає не лише ротор двигуна, а і те механічне навантаження, що з'єднане з його валом. При  $\omega = const$  цей момент урівноважується моментом механічного навантаження на валу та моментом, що створюється силами тертя і вихровими струмами – моментом н.х.  $M_0, H$ .

$$M_{em} = M_2 + M_0, \quad (5.6)$$

де  $M_2$  – момент механічного навантаження на валу;  
 $M_0$  – момент н.х..

При будь-якій зміні кутової частоти обертання ( $\omega = var$ ), виникає складова електромагнітного моменту, що йде на розгін чи гальмування обертових мас двигуна та виконавчого механізму. Ця складова називається динамічним моментом  $M_\delta$

$$M_\delta = J \cdot d\omega / dt, \quad (5.7)$$

де  $J$  – момент інерції,  $кг \cdot м^2$ ;  
 $d\omega / dt$  – швидкість зміни кутової частоти обертання.

$$J = m \cdot r, \quad (5.8)$$

$m$  – маса частин, що обертаються,  $кг$ ;  
 $r$  – радіус інерції,  $м$ .

З урахуванням динамічної складової  $M_\partial$  **рівняння моментів двигуна** (5.6) набуває вигляду

$$M_{em} = M_2 + M_0 + M_\partial . \quad (5.9)$$

Із виразу (5.9) випливає:

– при  $M_{em} > M_2 + M_0 + M_\partial > 0$  і  $d\omega/dt \approx \Delta\omega/\Delta t > 0$ . Тобто додатному прирощенню часу  $dt$  буде відповідати додатне прирощення кутової частоти  $\Delta\omega$ , отже відбувається **розгін обертових мас (двигуна)**;

– при  $M_{em} < M_2 + M_0 + M_\partial < 0$  і  $d\omega/dt \approx \Delta\omega/\Delta t < 0$ . Тобто додатному прирощенню часу  $dt$  буде відповідати від'ємне прирощення кутової частоти  $\Delta\omega$ , отже відбувається **гальмування двигуна** та сполученого з ним механізму;

– при  $M_{em} = M_2 + M_0 + M_\partial = 0$  і  $d\omega/dt \approx \Delta\omega/\Delta t = 0$ . Тобто маємо  $\omega = const$ .

Якщо рівняння моментів (5.6) помножити на частоту обертання  $\omega$  (враховуючи, що  $\omega = const$ ), то отримаємо **рівняння потужностей двигуна**

$$P_{em} = P_2 + P_0 , \quad (5.10)$$

де  $P_2$  – механічна потужність на валу,  $Вт$ ;

$P_0$  – як і у генератора, втрати потужності н.х., які дорівнюють сумі механічних  $P_{mex}$ , магнітних  $P_{магн}$  та додаткових втрат  $P_{дод}$ ,  $Вт$ .

Підставивши (5.10) у (5.5), будемо мати

$$U \cdot I_a = P_2 + I^2 \cdot \Sigma R_i + P_{mex} + P_{маг} + P_{дод} . \quad (5.11)$$

Враховуючи (5.1), рівняння (5.11) можна представити як

$$U \cdot (I - I_{3\phi}) = P_2 + I^2 \cdot \Sigma R_i + P_{mex} + P_{маг} + P_{дод} . \quad (5.12)$$

або

$$U \cdot I = P_2 + U \cdot I_{3\phi} + I^2 \cdot \Sigma R_i + P_{mex} + P_{маг} + P_{дод} , \quad (5.13)$$

де  $U \cdot I = P_1$  – підведена до двигуна електрична потужність;

$U \cdot I_{зб} = P_{зб}$  – втрати в обмотці збудження, тобто потужність, що витрачається на збудження;

$I^2 \cdot \Sigma R_i = P_{e.a.}$  – електрична потужність, що втрачається в колі якоря ДПС.

Тоді

$$P_1 = P_2 + P_{зб} + P_{e.a.} + P_{мех} + P_{маг} + P_{дод.} \quad (5.14)$$

Це рівняння (5.14) і є рівнянням балансу потужностей, на основі якого будується енергетична діаграма двигуна постійного струму, що відображує процес перетворення електричної потужності в механічну та втрати, які мають місце при цьому.

Енергетична діаграма ДПС паралельного збудження представлена на рисунку 5.1.

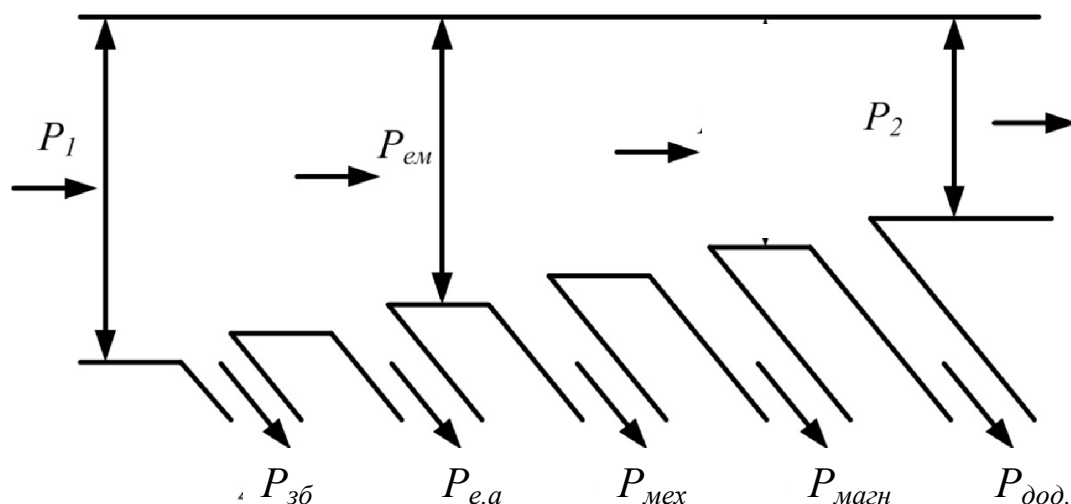


Рисунок 5.1 – Енергетична діаграма ДПС паралельного збудження

Згідно із виразом (5.14) первинна потужність  $P_1$  є електричною і споживається з мережі живлення. За рахунок цієї потужності покриваються втрати на збудження та електричні втрати у колі якоря, а решта складає електромагнітну потужність  $P_{ем}$ , яка в свою чергу втрачається на механічні, магнітні та додаткові втрати і перетворюється у корисну механічну потужність на валу двигуна  $P_2$ .

Визначивши сумарну потужність перерахованих вище втрат

$$\Sigma P = P_{зб} + P_{e.a.} + P_{мех} + P_{маг} + P_{дод.}, \quad (5.15)$$

можна підрахувати ККД ДПС за виразом

$$\eta_{ДВ} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{UI - \Sigma P}{UI} = 1 - \frac{\Sigma P}{UI}. \quad (5.16)$$

ККД ДПС становить 0,75—0,90 для машин потужністю від 1 до 100 кВт і 0,90—0,97 для машин потужністю понад 100 кВт. Набагато менше ККД машин постійного струму малої потужності. Наприклад, для машин потужністю від 5 до 50 Вт  $\eta = 0,15 \div 0,50$ . Зазначені значення ККД відповідають номінальному навантаженню машини. Залежність ККД машини постійного струму від навантаження виражається графіком  $\eta = f(P_2)$ , форма якого характерна для електричних машин (рисунку 5.2).

Коефіцієнт корисної дії електричної машини можна визначати: а) методом безпосереднього навантаження за результатами вимірів підведеної  $P_1$  і  $P_2$  потужностей, що віддається; б) непрямим методом за результатами вимірів втрат.

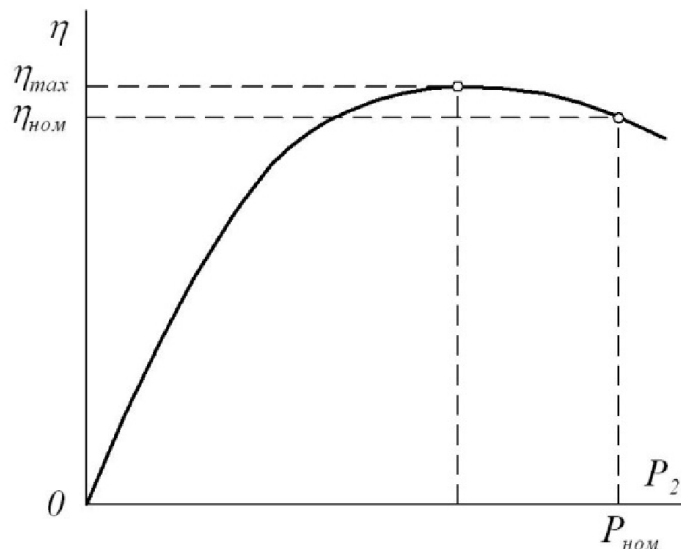


Рисунок 5.2 – Залежність  $\eta = f(P_2)$

Метод безпосереднього навантаження застосовується тільки для машин малої потужності, для інших випадків застосовується непрямий метод, як більше точний і зручний. Установлено, що при  $\eta > 80\%$  вимірювати ККД методом безпосереднього навантаження недоцільно, тому що він дає більшу помилку, ніж при застосуванні прямого методу.

Існує кілька непрямих способів визначення ККД. Найбільш простий спосіб холостого ходу двигуна, коли споживана машиною постійного струму потужність витрачається тільки на втрати х.х. Що ж стосується електричних втрат, то їх визначають розрахунковим шляхом після попереднього виміру електричних опорів обмоток і приведення їх до робочої температури.

### 3 Пуск і регулювання частоти обертання двигунів постійного струму

У відповідності із (3.7) (лекція 3) кутову частоту обертання двигуна можна виразити як

$$\omega = E_a / k \cdot \Phi, \quad (5.17)$$

або у відповідності із (3.6) (лекція 3), де  $k = p \cdot N / 2\pi \cdot a$  отримаємо

$$\omega = E_a \cdot 2\pi / p \cdot n \cdot \Phi. \quad (5.18)$$

Враховуючи вираз (5.4) отримаємо

$$\omega = (U - I_a \cdot \Sigma R_i) / k \cdot \Phi, \quad (5.19)$$

тобто кутова частота обертання  $\omega$  пропорційна напрузі  $U$  і обернено пропорційна магнітному потоку збудження  $\Phi$ .

Фізично це можна пояснити тим, що підвищення (зниження) напруги  $U$  або зниження (підвищення) потоку  $\Phi$  викличе збільшення (зменшення) різниці  $(U - E_a)$ , що в свою чергу, приводить згідно (5.3) до зростання (зниження) струму якоря  $I_a$ . Зростаючи (зменшуючись), струм підвищує (знижує) електромагнітний момент  $M_{em}$  (3.13) (лекція 3), а так як момент навантаження залишається незмінним, то зростає (знижується) частота обертання. Іншими словами, у двигунах постійного струму всяка зміна частоти обертання  $\omega$  зумовлюється необхідністю підтримки електричної рівноваги в колі якоря.

Вираз (5.19) вказує на можливі шляхи регулювання частоти обертання двигуна постійного струму:

1) зміною напруги  $U$ , яка підводиться до обмотки якоря; при цьому частота обертання може змінюватися від нуля до  $1,15 \omega_{ном}$  [пі-



двигуна підвищення напруги більше ніж на (10-15) % від номінального значення небажане через підвищення напруги між колекторними пластинами і погіршенням комутації];

– введенням додаткових опорів у коло якоря (зміна  $\Sigma R_i$ ), що дає можливість змінювати частоту обертання від номінального значення  $n_{ном}$  ( $\omega_{ном}$ ) до нуля;

– зміною магнітного потоку  $\Phi$  (не може бути реалізованим у двигунів з постійними магнітами), в насиченій машині потік можна лише знижувати і тим самим збільшувати частоту обертання (це досягається зменшенням струму обмотки збудження) від номінальної частоти обертання до (2-3)  $n_{ном}$  ( $\omega_{ном}$ ). Підвищення частоти обертання більше ніж у (2-3) рази обмежене умовами комутації та механічною міцністю обертових частин двигуна.

Струм якоря двигуна постійного струму визначиться згідно (5.3) як

$$I_a = (U - E_a) / \Sigma R_i. \quad (5.20)$$

При незмінних напрузі  $U$  та опорі кола якоря  $\Sigma R_i$ , струм  $I_a$  залежить лише від проти-ЕРС  $E_a$ , тому найбільшого значення струм якоря досягає в момент пуску, коли проти-ЕРС в обмотці якоря не створюється, так як  $\omega = 0$ . Отже безпосередньо в момент пуску, пусковий струм двигуна

$$I_{пуск} = U / \Sigma R_i. \quad (5.21)$$

Вираз (5.21) можна вважати справедливим і для двигунів паралельного та змішаного збудження де  $I_{а пуск} \approx I_{пуск}$ , враховуючи що  $I_{а пуск} \gg I_{зб}$ .

Загальний опір кола якоря незначний, тому пусковий струм при номінальній напрузі досягає недопустимо великих значень, що в (10-20) разів перевищує номінальний струм двигуна. Такий струм дуже небезпечний для двигуна. По-перше, він може викликати круговий вогонь по колектору, по-друге, такий струм викликає значний пусковий момент, який своєю ударною дією може привести до механічного руйнування обертових частин якоря і, нарешті, цей струм викликає значне падіння напруги в мережі, що шкідливо діє на роботу інших споживачів, які ввімкнені в мережу. Враховуючи все це, пуск

безпосереднім ввімкненням двигуна в мережу (безреостатний пуск) можна застосувати лише для двигунів потужністю не більше (0,7-1,0) кВт. В таких двигунів, завдяки збільшеному опору кола якоря, пусковий струм не перевищує номінальний більше, ніж у (3-5) раз, що не уявляє небезпеки ні для двигуна, ні для мережі. Що ж стосується двигунів більшої потужності, то при їх пуску, для обмеження пускового струму, слід, згідно (5.21), або знижувати напругу, або збільшувати опір кола якоря.

Пуск на зниженій напрузі застосовується лише в ДПС великої потужності, наприклад, у тягових двигунах електровозів, на момент пуску вони умикаються послідовно, а після пуску – паралельно один другому.

Пуск збільшенням опору в колі ротора досить поширений для двигунів потужністю більше 1 кВт. Такий пуск називається реостатним пуском і здійснюється із застосуванням спеціальних пускових реостатів (рисунок 5.3, а), що вмикаються послідовно з обмоткою якоря і дозволяють ступінчасто знижувати пусковий опір від максимального значення [при якому  $I_{пуск} = (2-3)I_{ном}$ ] до нуля.

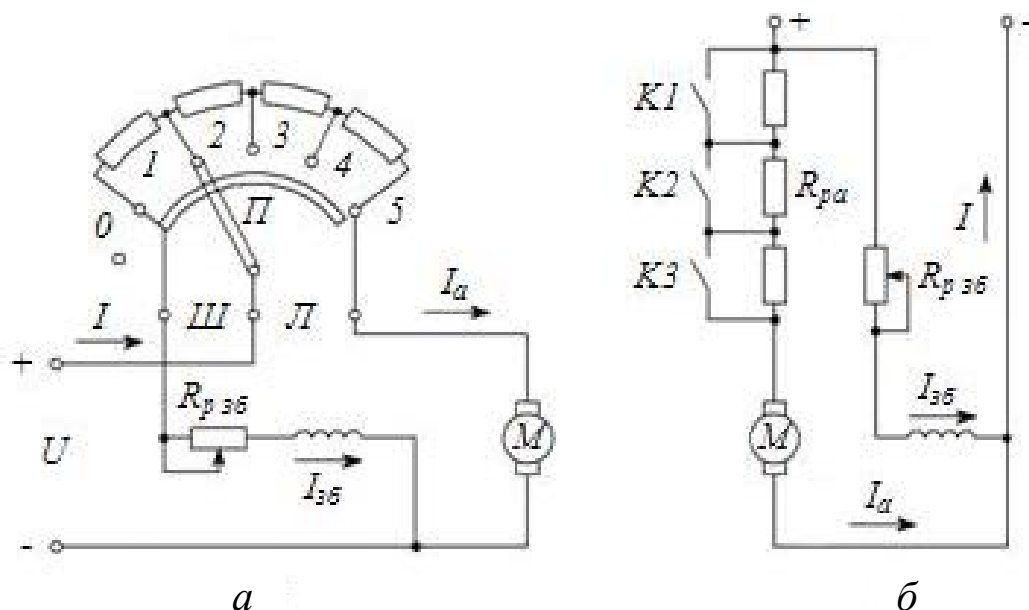


Рисунок 5.2 – Схема пуску двигуна паралельного збудження за допомогою пускового реостата а) і пускових опорів б)

Реостатний пуск ДПС здійснюється наступним чином. Перед пуском двигуна необхідно важіль П реостата поставити на контакт «0» (рисунок 5.3). Потім включають рубильник, переводять важіль на перший проміжний контакт 1 і коло якоря двигуна виявляється підключеної до мережі через найбільший опір реостата  $R_{рег.а} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$ .

Одночасно через важіль П и шину Ш до мережі підключається обмотка збудження, струм у якій протягом усього періоду пуску не залежить від положення важеля П, тому що опір шини в порівнянні з опором обмотки збудження незначний.

Пусковий струм якоря при повному опорі пускового реостата

$$I_n = \frac{U - E_a}{\sum R_i + R_{рег.а}}. \quad (5.22)$$

З появою струму в колі якоря  $I_{n\max}$  виникає пусковий момент  $M_{n\max}$ , під дією якого починається обертання якоря. При зростанні частоти обертання збільшується противо-ЕРС  $E_a = k \cdot \Phi \cdot n$ , що веде до зменшення пускового струму і пускового моменту.

У міру розгону якоря двигуна важіль пускового реостата перемикають у положення 2, 3 і т.д. В положенні 5 важеля реостата пуск двигуна закінчується ( $R_{рег.а} = 0$ ). Опір пускового реостата вибирають таким, щоб найбільший пусковий струм перевищував номінальний не більш ніж в 2-3 рази.

Оскільки обертаючий момент двигуна  $M$  прямо пропорційний потоку  $\Phi$ , то для полегшення пуску двигуна паралельного і змішаного збудження опір реостата в колі збудження  $R_{рзб}$  варто повністю вивести ( $R_{рег.зб} = 0$ ). Потік збудження  $\Phi$  у цьому випадку отримує найбільше значення і двигун розвиває необхідний обертаючий момент при меншому струмі якоря.

Для пуску двигунів більшої потужності застосовувати пускові реостати недоцільно, тому що це призводить до значних втрат енергії. Крім того, пускові реостати мають великі масогабаритні показники. Тому у двигунах великої потужності застосовують безреостатний пуск двигуна шляхом зниження напруги.

Реверсування двигуна (зміна напрямку обертання) досягається або зміною напрямку струму в обмотці якоря при незмінному напрямі струму в обмотці збудження, або, навпаки, зміною струму в обмотці збудження при незмінному напрямі струму в обмотці якоря.

Зміна полярності затискачів двигуна до реверсування не призводить, тому що змінює одночасно напрям струму в обох обмотках.

## 4 Характеристики ДПС

Властивості двигунів, як і генераторів, оцінюються їх характеристиками, основними з них є робочі, моментні, швидкісні та механічні.

**Робочі характеристики двигуна** – це сукупність залежностей частоти обертання  $n(\omega)$ , струму навантаження  $I$ , підведеної потужності  $P_1$ , корисного моменту на валу  $M_2$ , коефіцієнта корисної дії  $\eta$  від корисної потужності на валу  $P_2$  при незмінних напрузі  $U$  та опорі в колі збудження  $R_3$ . Цими характеристиками визначаються експлуатаційні властивості машини.

$$n(\omega); I; P_1; M_2; \eta = f(P_2). \quad (5.23)$$

Враховуючи, що  $P_1 = U \cdot I$  і незмінність напруги, що є умовою знімання цих характеристик, характеристики струму  $I = f(P_2)$  та підведеної потужності  $P_1 = f(P_2)$  будуть, якщо виразити їх у відносних одиницях, зображуватись однією лінією.

Робочі характеристики двигуна завжди будуються в одній системі координат.

**Моментні характеристики двигуна** – низка залежностей електромагнітного моменту  $M_{em}$  від струму якоря  $I_a$  –  $M_{em} = f(I_a)$  при  $U = const$ ;  $R_{3\delta} = const$ .

**Швидкісні характеристики двигуна** – це залежності частоти обертання  $n(\omega)$  від струму якоря  $I_a$  –  $n(\omega) = f(I_a)$  при  $U = const$ ;  $R_{3\delta} = const$ .

**Механічні характеристики двигуна** – залежності частоти обертання  $n(\omega)$  від електромагнітного моменту  $n(\omega) = f(M_{em})$  при  $U = const$ ;  $R_{3\delta} = const$ .

Слід зазначити, що швидкісні та механічні характеристики двигуна, якщо виражати величини у відносних одиницях, для двигунів незалежного та паралельного збудження будуть зображуватись одними лініями, враховуючи (3.13) (лекція 3).

Швидкісні та механічні характеристики можуть бути **природними**, якщо напруга, що підводиться до двигуна, номінальна, додатковий опір в колі якоря відсутній, магнітний потік номінальний.

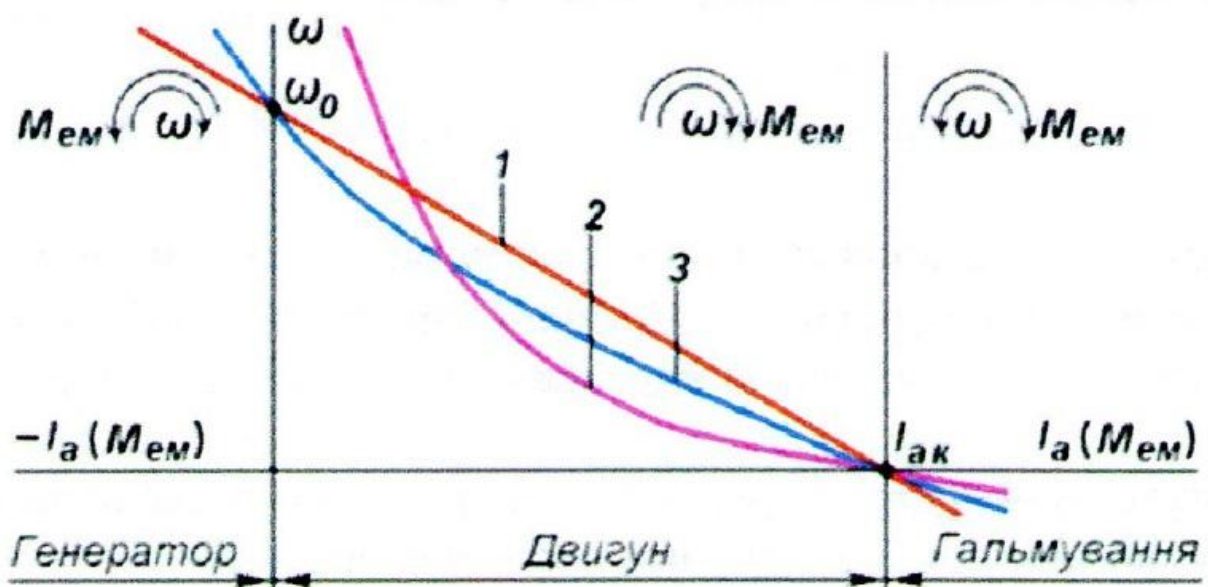
Коли ж будь-яка з перерахованих вище величин відрізняється від номінальної, то характеристики називаються **штучними**:

- **штучна реостатна характеристика** – отримується якщо в коло якоря увімкнути додатковий опір  $R_{доd}$ ;
- **штучна характеристика на зниженій напрузі**, коли напруга, що прикладена до двигуна, менша від номінальної;
- **штучна характеристика при ослабленому магнітному полі** – в коло збудження увімкнений регулювальний опір  $R_{рег}$ , який знижує струм збудження і відповідно магнітний потік.

## 5 Режими роботи машини постійного струму

Як уже відзначалось, машина постійного струму оборотна, тобто може працювати як в режимі двигуна, так і в режимі генератора. Розглянемо на прикладі двигуна паралельного збудження (в коло якоря якого введений додатковий опір), за яких умов відбувається перехід такого двигуна з одного режиму роботи в інший.

Припустимо, що, в процесі зміни навантаження, магнітний потік машини залишається незмінним  $\Phi = const$ . У цьому випадку електромагнітний момент пропорційний струму в колі якоря і механічна характеристика  $n(\omega) = f(M_{ем})$  може бути представлена залежністю  $n(\omega) = f(I_a)$  (рисунок 5.3), що перетинає як вісь абсцис – точка  $I_{ак}$ , так і вісь ординат – точка  $n_0$ .



1 – з паралельним (незалежним) збудженням; 2 – з послідовним збудженням; 3 – зі змішаним збудженням;

Рисунок 5.3 – Режими роботи двигуна постійного струму

Якщо цю характеристику продовжити в обидва боки за межі осей координат (**пряма I**), то можна показати, що електрична машина залежно від величини і знака зовнішнього моменту, що діє на її вал з боку пов'язаного з ним механізму, може працювати в трьох режимах: **в режимі двигуна, генератора і в режимі гальмування.**

Відрізок прямої  $\omega_0 = I_{ак}$  слід розглядати як характеристику роботи двигуна. Дійсно, на цьому відрізку електромагнітний момент  $M_{ем}$ , що його розвиває машина і під дією якого вона обертається, має той же напрям, що і частота обертання  $\omega$ . Точка  $\omega_0$  називається кутковою частотою обертання **ідеального н.х.** (так як струм  $I_a = 0$ , що в реальних умовах в режимі двигуна неможливо), точка  $I_{ак}$  відповідає струму якоря, який виникає при пуску двигуна. Слід зазначити, що додатне значення струму на цьому відрізку забезпечується тим, що напруга  $U$ , прикладена до обмотки якоря двигуна, більша ніж проти-ЕРС  $E_a$ , яка в цій обмотці створюється ( $U > E_a$ ) – це і є умовою роботи машини в **режимі двигуна.**

На відрізку  $\omega \geq \omega_0$  зростання частоти обертання викликає збільшення  $E_a$  вище від напруги  $U$ , тому струм змінює свій напрям (5.20) і стає направленим не в машину, а в мережу. Причиною зростання частоти обертання може бути будь-який механічний момент, що співпадає з напрямом обертання ротора машини, а електромагнітний момент, як і струм, змінює свій напрям і стає гальмівним. Тому цей режим роботи називається **генераторним, або режимом рекуперативного гальмування з віддачею потужності до мережі.**

На ділянці характеристики нижче точки  $I_{ак}$  напрям частоти обертання не співпадає з напрямом електромагнітного моменту, який розвиває машина. Це можливо в тих випадках, коли на валу машини є активний статичний момент, більший від пускового моменту, що створює двигун, наприклад момент вантажу, який опускається краном. Такий режим роботи називається **гальмівним, або гальмуванням противмиканням.** Як видно з рисунку 5.3, значення струму в режимі гальмування досить велике – більше від  $I_{ак}$ , тому що напрям обертання змінився, а отже величина струму пропорційна не різниці напруги та ЕРС, яка також змінила напрям, а їх сумі

( $I_a = (U + E_a) / \sum R_i$ ). При такому гальмуванні в коло ротора необхідно увести додатковий опір, щоб обмежити величину струму.

Гальмування противмиканням може застосовуватись не лише при опусканні вантажів краном, а і при необхідності швидкої зупинки машини шляхом реверсування. При цьому ротор продовжує обертатись у тому ж напрямі, який він мав до реверсування, а електромагнітний момент направлений, завдяки реверсуванню, у зворотний.

У двигуна послідовного збудження, **крива 2** (рисунок 5.3), при зміні струму якоря змінюється і магнітний потік (5.1) тому залежність  $\omega = f(I_a)$  має криволінійний характер. Ця крива не перетинає вісь  $\omega$ , тобто **двигун з послідовним збудженням не може перейти в генераторний режим**. Фізично це пояснюється тим, що зростання частоти обертання  $\omega$  не може збільшувати ЕРС якоря  $E_a$ , через зниження струму якоря  $I_a$ , а отже, і магнітного потоку  $\Phi$ . Таким чином, двигун послідовного збудження може мати лише два режими роботи – двигуна та гальмування противмиканням.

Двигун змішаного збудження, як і двигун паралельного, має всі три режими: **крива 3** (рисунок 5.3).

Всі характеристики, що представлені на рисунку 5.3 відповідають випадку, коли в коло якоря машини ввімкнений додатковий опір  $R_{\text{дод}}$ .

## Контрольні запитання

1. Де застосовуються двигуни постійного струму?
2. На яку номінальну потужність виготовляються сучасні двигуни постійного струму?
3. Як класифікуються двигуни постійного струму?
4. Записати та проаналізувати рівняння струмів двигунів різних способів збудження.
5. Записати та проаналізувати рівняння ЕРС (напруги) ДПС.
6. Записати та проаналізувати рівняння моментів ДПС.
7. Записати та проаналізувати рівняння потужностей ДПС.
8. Що уявляє собою енергетична діаграма двигуна постійного струму?
9. Яким чином можна регулювати частоту обертання двигуна постійного струму?
10. Чому пусковий струм двигуна в кілька разів перевищує номінальний і як його можна знизити?
11. Чому обмотка збудження двигунів паралельного і змішаного збудження під час пуску не повинна мати регулювальних опорів?
12. Які характеристики знімаються для двигунів постійного струму?
13. Які характеристики називають природними і які штучними?
14. Які характеристики називають м'якими і які жорсткими?
15. Які характеристики називають робочими, як вони знімаються і будуються для двигунів незалежного збудження?
16. Які режими роботи може мати машина постійного струму?
17. За яких умов відбувається перехід машини постійного струму з режиму двигуна в режим генератора?
18. За яких умов відбувається перехід машини постійного струму з режиму двигуна в режим гальмування?
19. Чому ДПС із послідовним збудженням не може перейти в генераторний режим?