ТЕМА

Електричні машини постійного струму

Електричні машини постійного струму служать для перетворення механічної енергії в електричну (електричний генератор) і для перетворення електричної енергії в механічну (електричний двигун).

Робота електричних двигунів постійного струму базується на принципі взаємодії магнітного поля і провідника зі струмом.

Основними перевагами електричних двигунів постійного струму є можливість поступового регулювання швидкості обертання вала електричними способами та значний пусковий момент. Ці переваги зумовлюють галузь виростання електричних двигунів постійного струму – електропривод, що регулюється (перш за все – електротранспорт).

Сучасні електричні двигуни постійного струму виготовляються із широким діапазоном потужностей. Наприклад, двигуни трамваїв мають потужність від 33 до 54,5 кВт, двигуни електровозів – 320÷450 кВт, кранові двигуни – 3÷100 кВт, а двигуни прокатних станів мають потужність у декілька тисяч кВт.

Генератори постійного струму, у порівнянні з генераторами змінного струму, застосовуються обмежено. Перевагою генератора постійного струму є те, що на виході з нього маємо постійний струм. До середини 50-х років XX сторіччя не було надійних і дешевих напівпровідникових випрямлячів, що й зумовило широке застосування генераторів постійного струму на той час. Основними недоліками генераторів постійного струму є незадовільні масово-габаритні показники (великі габарити і вага), у порівнянні з генераторами змінного струму, та наявність колектора, що іскрить. Саме ці недоліки й зумовлюють обмеженість застосування генераторів постійного струму.

Конструкція електричних машин постійного струму. Існують два типи машин постійного струму: *колекторні* і *безколекторні* (уніполярні). Машини уніполярного типу на сьогодні не виготовляються. Тому розглядати будемо тільки колекторні машини. Конструктивно електрична машина постійного струму складається з двох частин (рис. 5.12): нерухомої і рухомої (обертової).

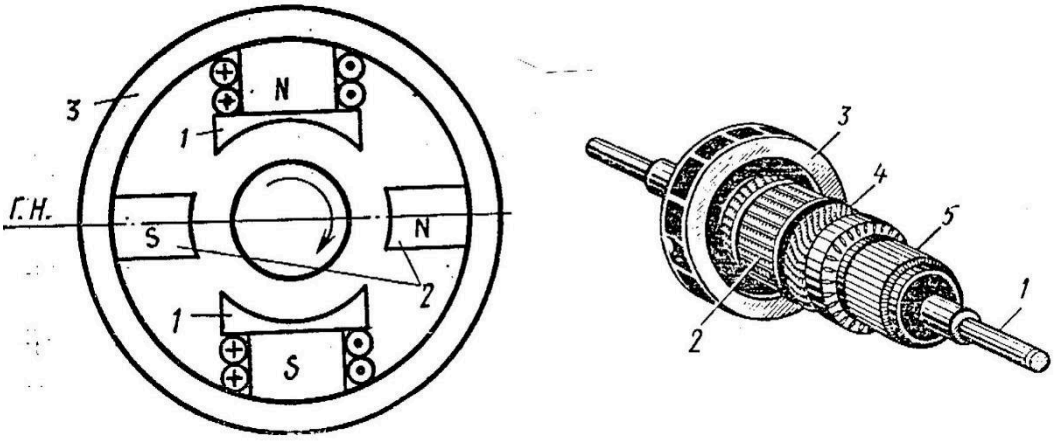

Рис. 5.12 – Конструкція машини постійного струму: а – нерухома частина, б – рухома частина

Основою нерухомої частини (рис. 5.12,а) є *станина*, за допомогою якої здійснюється кріплення машини. Станина виготовляється з чавуну або сталі. До станини кріпляться основні 1 та додаткові 2 полюси, осердя яких виготовляється з електротехнічної листової сталі з малим магнітним опором. Обмотка полюсів, по якій проходить постійний електричний струм, називається *обмоткою збудження*. Число полюсів завжди кратне двом. Обмотка полюсів вмикається таким чином, щоб полюси повторювалися по колу (N-S-N-S-…). Додаткові полюси служать для поліпшення умов комутації. Полюси створюють основний магнітний потік. Вводиться поняття *геометричної нейтралі*, яка поділяє простір між полюсами і в якій магнітна індукція дорівнює нулю.

Рухома (обертова) частина (рис. 5.12,б) машини постійного струму називається *якір*. Якір складається зі сталевого вала 1, на якому знаходиться осердя 2, виготовлене з листів електротехнічної сталі. В пази осердя закладено обмотку 4. Обмотка якоря складається з окремих *секцій*. Кінці секцій приєднуються до пластин колектора 5, які виготовляються з міді та ізольовані одна від одної (поперечний переріз колектора подано на рис. 5.13). Для охолодження електричної машини на вал також насаджений вентилятор 3. Провідники обмотки секції з’єднуються так, щоб ЕРС у сторонах секції додавалися. Для цього сторони кожної секції розташовують над полюсами різної полярності на відстані, яка позначається τ та називається *поясна поділка* (дуга кола якоря між осями сусідніх полюсів).

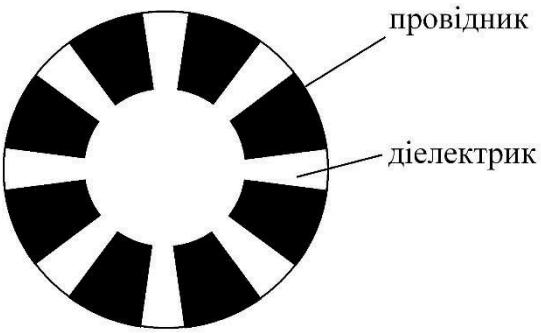

Рис. 5.13 – Поперечний переріз колектора

Секції обмотки якоря бувають двох видів: *петльові* (рис. 5.14,а) та *хвильові* (рис.5.14,б) (на рисунку полюси розташовано під обмоткою).

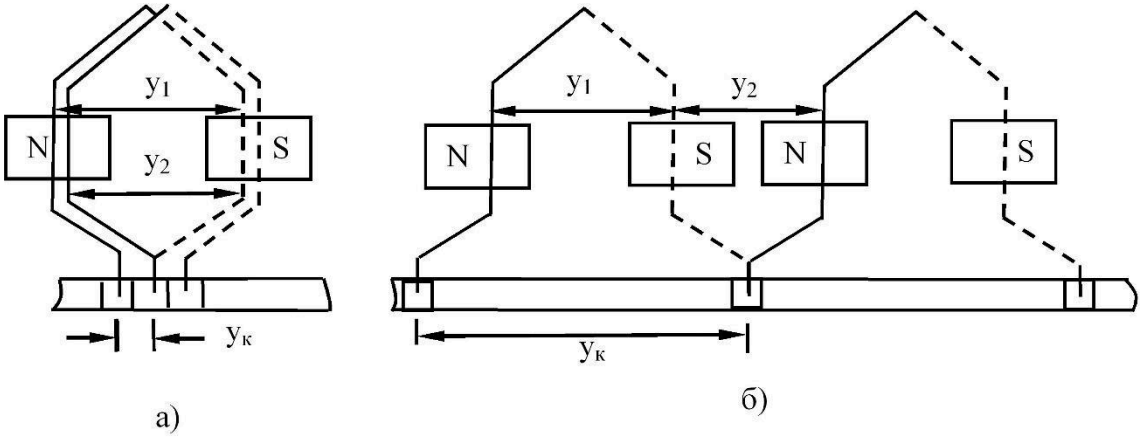

Рис. 5.14 – Види секцій обмоток якоря: а – петльова, б – хвильова

Відстань між початком та кінцем секції називають *першим частковим кроком* (на рис. 5.14 позначено y_1). Відстань між кінцем попередньої секції та початком другої секції називають *другим частковим кроком* (на рис. 5.14 позначено y_2). Відстань між точками приєднання початків сусідніх секцій до колектора називають *кроком по колектору* (на рис. 5.14 позначено $y_к$).

При з'єднанні секцій обмотки якоря другий частковий крок можна зробити як у напрямку, що є протилежним першому початковому кроку (петльова обмотка), так і у тому ж напрямку, що і перший початковий крок (хвильова обмотка). Крок по колектору для петльової обмотки дорівнює $y_к = y_1 - y_2$, або одному кроку. Крок по колектору для хвильової обмотки дорівнює $y_к = y_1 + y_2$. Для хвильової обмотки крок по колектору обирають таким чином, щоб, обходячи один раз навколо якоря, другий оберт починався з початку секції, що знаходиться зліва від першої.

Петльова обмотка якоря застосовується в електричних машинах постійного струму великої потужності, хвильова обмотка – у машинах середньої та малої потужності.

Електричний контакт між нерухомою частиною та якорем електричної машини здійснюється за допомогою *щіткового вузла*. Щітковий вузол

складається зі щіток (графітних, мідно-графітних, бронзо-графітних), щіткової траверси та щіткотримача.

Щітки безпосередньо контактують із пластинами колектора. За допомогою щіток у випадку, якщо електрична машина є двигун, на пластини колектора подається напруга. Якщо електрична машина є генератор, за допомогою щіток з колектора знімається постійна напруга.

Колектор призначений для зміни напрямку струму в провідниках обмотки якоря в той момент, коли провідники проходять геометричну нейтраль. При роботі колектор іскрить.

Принцип зворотності електричних машин постійного струму. Принцип зворотності полягає у тому, що будь-яка машина постійного струму може працювати і як електричний генератор, і як електричний двигун без зміни її конструкції.

Електричний генератор перетворює механічну енергію в електричну. ЕРС E, що індукується, викликає електричний струм силою $I_я$ та долає падіння напруги ($I_я \cdot R_я$) в обмотці якоря та опорі навантаження U. *Основне рівняння генератора*:

$$E = U + I_я \cdot R_я, \tag{5.33}$$

де $R_я$ – опір обмотки якоря.

Електричний двигун перетворює електричну енергію у механічну. Зовнішня напруга U викликає електричний струм силою $I_я$ та долає ЕРС якоря E й падіння напруги в обмотці якоря ($I_я \cdot R_я$). *Основне рівняння двигуна*:

$$U = E + I_я \cdot R_я. \tag{5.34}$$

Для одиничного прямолінійного провідника, що рухається з постійною швидкістю v у рівномірному магнітному полі з магнітною індукцією С перпендикулярно магнітним силовим лініям можна записати закон електромагнітної індукції (формула (2.32)):

$$E = B \cdot \ell_а \cdot v, \tag{5.35}$$

де E – величина ЕРС, [В]; V – магнітна індукція, [Тл]; $\ell_а$ – "активна" довжина провідника, [м]; v – швидкість руху провідника відносно магнітних силових ліній, [м/с].

Для одиничного прямолінійного провідника довжиною $\ell_а$, по якому протікає електричний струм силою I, розташованого у зовнішньому магнітному полі з індукцією B перпендикулярно магнітним силовим лініям, можна записати закон електромагнітних сил (формула (2.27)):

$$F = B \cdot \ell_а \cdot I, \tag{5.36}$$

де F – електромагнітна сила, [Н]; I – сила струму, [А].

З формул (5.35), (5.36) випливає рівняння перетворення механічної потужності $P_{мех}$ в електричну потужність $P_{ел}$ за відсутності втрат:

$$F \cdot v = E \cdot I \qquad \text{або} \qquad P_{мех} = P_{ел} . \tag{5.37}$$

Принцип роботи генератора. При обертанні якоря (рис. 5.15,а) виникає ЕРС E, що є причиною виникнення електричного струму силою I. Електромагнітна механічна сила $\vec{F}$ за правилом "лівої руки" спрямована проти напрямку обертання. Ця сила є гальмуючою і компенсується силою первинного двигуна (привода генератора).

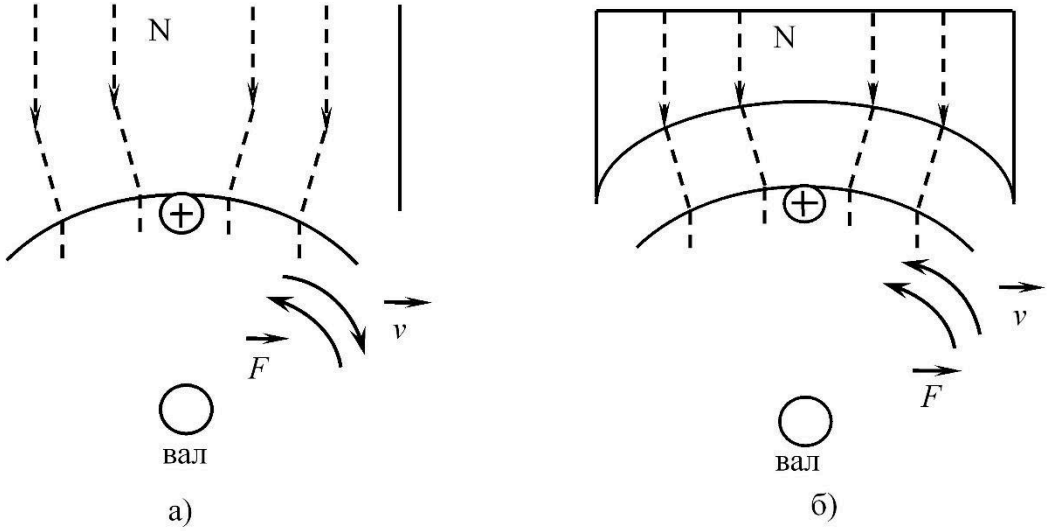

Рис. 5.15 – Принцип роботи електричної машини постійного струму: а – генератор, б – двигун

Принцип роботи двигуна. По провіднику (рис. 5.15,б) тече електричний струм силою I, виникає електромагнітна механічна сила $\vec{F}$, що діє по колу якоря. Ця сила є причиною руху, тому її напрямок збігається з напрямком швидкості v обертання вала. ЕРС E за правилом "правої руки" спрямована проти напрямку струму і називається *проти-ЕРС*. Проти-ЕРС компенсується зовнішньою напругою мережі U.

ЕРС обмотки якоря двигуна. Визначимо величину проти-ЕРС.

Магнітний потік одного полюса Φ_0 у повітряному зазорі між полюсами нерухомої частини та якорем двигуна визначається за формулою (2.5):

$$\Phi_0 = \int B \cdot dS = \int_0^{\tau} B \cdot \ell \cdot dx \,, \tag{5.38}$$

де B – величина магнітної індукції у зазорі, [Тл]; ℓ – довжина провідника, [м]; τ – поясна поділка, [м].

Середнє значення магнітної індукції $B_{сер}$ у повітряному зазорі між полюсами нерухомої частини та якорем двигуна визначається за формулою:

$$B_{\text{сер}} = \frac{1}{\tau} \cdot \int_0^{\tau} B \cdot dx \quad . \tag{5.39}$$

Очевидно

$$\Phi_0 = B_{\text{сер}} \cdot \ell \cdot \tau \quad . \tag{5.40}$$

Середнє значення ЕРС $E_{\text{сер}}$, що індукується в одному провіднику обмотки якоря, який рухається з лінійною швидкістю v, визначається за законом електромагнітної індукції (у формулу (5.35) підставляємо формулу (5.40)):

$$\mathrm{E}_{\text{сер}} = \mathrm{B}_{\text{сер}} \cdot \ell \cdot \mathrm{v} = \frac{\mathrm{v}}{\tau} \cdot \Phi_0 \quad . \tag{5.41}$$

Вважаючи, що загальна кількість провідників якоря дорівнює N, то в одній паралельній вітці послідовно з'єднано $\frac{N}{2 \cdot a}$ провідників (де позначено a – кількість пар паралельних витків обмотки якоря). Тоді можна записати значення ЕРС E, що індукується в обмотці якоря, який рухається з лінійною швидкістю v:

$$E = \frac{N}{2 \cdot a} \cdot E_{\text{сер}} = \frac{N}{2 \cdot a} \cdot \frac{v}{\tau} \cdot \Phi_0 \quad . \tag{5.42}$$

Лінійна швидкість v обертання якоря визначається за формулою:

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \quad , \tag{5.43}$$

де D – діаметр якоря, [м]; n – кількість обертів якоря за хвилину, [об/хв].

Поясна поділка τ якоря визначається за формулою:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} \quad , \tag{5.44}$$

де p – кількість пар полюсів машини.

Підставляємо формули (5.43) та (5.44) у формулу (5.42) й отримуємо остаточну формулу для ЕРС (проти-ЕРС) E, що індукується в обмотці якоря при його обертанні з кількістю обертів n:

$$E = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a} \cdot n \cdot \Phi_0 = C_e \cdot n \cdot \Phi_0 , \qquad (5.45)$$

де позначено $C_e = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a}$ – *стала машини постійного струму* (залежить тільки від конструкції машини – кількості пар полюсів p, кількості провідників N та кількості пар паралельних витків обмотки якоря a).

Напрямок ЕРС, що індукується в обмотці якоря при його обертанні, обернений напрямку струму, який тече по обмотці.

Електромагнітний момент на валу машини постійного струму. На провідник довжиною ℓ зі струмом силою I, що розташований у зовнішньому магнітному полі з індукцією $B_{сер}$, діє електромагнітна сила (формула (5.36)):

$$F = B_{сер} \cdot \ell \cdot I. \qquad (5.46)$$

З курсу фізики відомо, що момент сили – це добуток сили на плече сили. Тому для визначення електромагнітного обертального моменту на валу електричної машини постійного струму необхідно помножити електромагнітну силу (5.46), що діє на один провідник зі струмом, на плече $\frac{D}{2}$ та кількість провідників N:

$$M = F \cdot \frac{D}{2} \cdot N, \ [\text{Н} \cdot \text{м}]. \qquad (5.47)$$

Сила струму I в одному провіднику обмотки якоря дорівнює силі струму в одному паралельному витку:

$$I = \frac{I_я}{2 \cdot a} , \qquad (5.48)$$

де $I_я$ – сила струму, що споживається двигуном або віддається генератором, [А]; a – кількість пар паралельних витків обмотки якоря.

У формулу (5.47) підставляємо формулу (5.46), враховуємо формули (5.40), (5.44), (5.48) та отримуємо остаточну формулу для визначення електромагнітного моменту на валу машини постійного струму:

$$M = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot \Phi_0 \cdot I_я = C_м \cdot \Phi_0 \cdot I_я , \qquad (5.49)$$

де позначено $C_м = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a}$ – *стала машини постійного струму* (залежить тільки від конструкції машини – кількості пар полюсів p, кількості провідників N та кількості пар паралельних витків обмотки якоря a).

Порівнюючи сталі машини $C_е$ та $C_м$, отримуємо зв'язок між ними:

$$\frac{C_е}{C_м} = \frac{\pi}{30}. \qquad (5.50)$$

Реакція якоря в машинах постійного струму. При роботі машини постійного струму магнітне поле якоря впливає на магнітне поле полюсів. Внаслідок цього виникає *реакція якоря*. Раніше було введено поняття геометричної нейтралі електричної машини постійного струму (див. рис. 5.12,а), яка поділяє простір між полюсами і в якій магнітна індукція дорівнює нулю. Внаслідок реакції якоря на геометричній нейтралі магнітна індукція перестає дорівнювати нулю. Лінія, на якій магнітна індукція дорівнює нулю, називається *фізичною нейтраллю*. У генератора фізична нейтраль зміщується відносно геометричної нейтралі у напрямку обертання якоря, в електричного двигуна – проти напрямку обертання.

Для запобігання виникненню реакції якоря в електричних машинах постійного струму застосовують додаткові полюси (рис. 5.12,а). Додаткові полюси розташовують на геометричній нейтралі нерухомої частини електричної машини. Їх обмотка вмикається послідовно в коло якоря, і їх магнітне поле компенсує реакцію якоря.

Комутація в машинах постійного струму. *Комутація* – процес зміни напрямку струму в секції обмотки якоря при його обертанні. В машинах постійного струму виділяють комутацію *електромагнітну* (зумовлена електричним причинами) та *механічну* (зумовлена механічними причинами).

Розглянемо електромагнітну комутацію. При обертанні якоря секції обмотки послідовно переходять з одного витка на інший (рис. 5.16). При цьому відбувається зміна сили струму, що протікає через щітки.

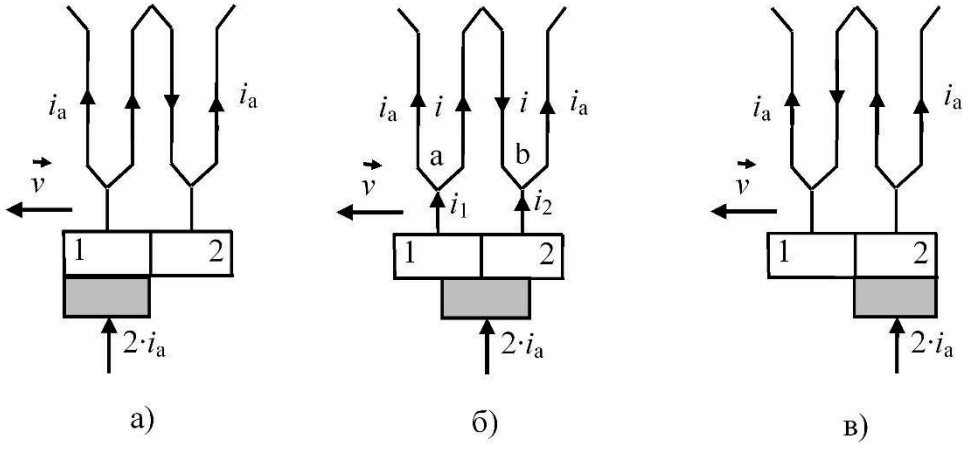

Рис. 5.16 – Комутація секції обмотки електричної машини постійного струму

У початковий момент часу (рис. 5.16,а) сила струму $i_а$ в першій секції є удвічі меншою за силу струму $2 \cdot i_а$, що підходить до щітки; струм $i_а$ спрямований за годинниковою стрілкою. У наступний момент часу (рис. 5.16,б) після повороту якоря струм у першій секції починає змінюватися. При подальшому повороті якоря (рис. 5.16,в) сила струму у першій секції знову дорівнює $i_а$, але струм спрямований проти годинникової стрілки.

Проаналізуємо процес комутації за допомогою рис. 5.16,б. Через контакт із пластиною 1 колектора проходить струм силою i_1, а через контакт із пластиною 2 колектора – струм силою i_2. Площа доторкання щіткою кожної з пластин становить:

$$S_1 = \ell_{щ} \cdot (b_к - v_к \cdot t), \qquad S_2 = \ell_{щ} \cdot v_к \cdot t,$$

де $\ell_{щ}$ – довжина щитки в осьовому напрямку, [м]; $b_к = v_к \cdot T_к$ – ширина колекторної пластини (дорівнює ширині щітки) , [м]; $v_к$ – лінійна швидкість колектора, [м/с]; t – проміжок часу від початку комутації, [с]; $T_к$ – період комутації, [с].

Опір перехідного контакту між щіткою та пластиною 1 $R_{пщ1}$ або 2 $R_{пщ2}$ колектора буде більше опору $R_{пщ}$ перехідного контакту при повному контакті щітки із колекторною пластиною у стільки разів, у скільки повна площа щітки $S_{щ} = \ell_{щ} \cdot b_к$ більше площі доторкання щіткою пластини:

$$R_{пщ1} = R_{пщ} \cdot \frac{b_к}{b_к - v_к \cdot t} = R_{пщ} \cdot \frac{T_к}{T_к - t}, \qquad R_{пщ2} = R_{пщ} \cdot \frac{b_к}{v_к \cdot t} = R_{пщ} \cdot \frac{T_к}{t}.$$

При комутації у секції за рахунок її індуктивності виникає ЕРС самоіндукції:

$$e_с = -L \cdot \frac{di}{dt},$$

де L – індуктивність секції, [Гн].

За рахунок перетинання ліній результуючого поля виникає комутаційна ЕРС $e_к$.

Складаємо вузлові рівняння за першим законом Кірхгофа: вузол a: $i_1 = i + i_а$; вузол b: $i_2 = -i + i_а$.

Складаємо контурне рівняння за другим законом Кірхгофа:

$$i_1 \cdot R_{пщ1} - i_2 \cdot R_{пщ2} = e_с + e_к.$$

Отримуємо неоднорідну систему з трьох лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} i_1 = i + i_a \\ i_2 = -i + i_a \\ i_1 \cdot R_{\text{тщ1}} - i_2 \cdot R_{\text{тщ2}} = e_c + e_к \end{cases}.$$

Розв'язання системи рівнянь дає вираз для сили струму:

$$i = i_a \cdot (1 - 2 \cdot \frac{t}{T_к}) + \frac{e_c + e_к}{R_{\text{тщ}} \cdot \frac{T_к}{t} \cdot \frac{T_к}{T_к - t}} = i_a \cdot (1 - 2 \cdot \frac{t}{T_к}) + \frac{e_c + e_к}{R_щ} = i_п + i_д \qquad (5.51)$$

де $R_щ = R_{\text{тщ}} \cdot \frac{T_к}{t} \cdot \frac{T_к}{T_к - t}$ позначено – повний опір секції;

$i_п = i_a \cdot (1 - 2 \cdot \frac{t}{T_к})$ – лінійна складова сили струму комутації;

$i_д = \frac{e_c + e_к}{R_щ}$ – додаткова складова сили струму комутації.

Якщо буде виконана умова $e_с = -e_к$, то у формулі (5.51) другий доданок буде дорівнювати нулю і струм у секції буде змінюватися за лінійним законом $i_п$.

Аналіз формули для повного опору секції $R_щ$ показує, що цей опір має мінімум при $t = \frac{T_к}{2}$ (у середині періоду комутації): $R_щ = 4 \cdot r_щ$. При $t = 0$ та $t = T_к$: $R_щ \to \infty$.

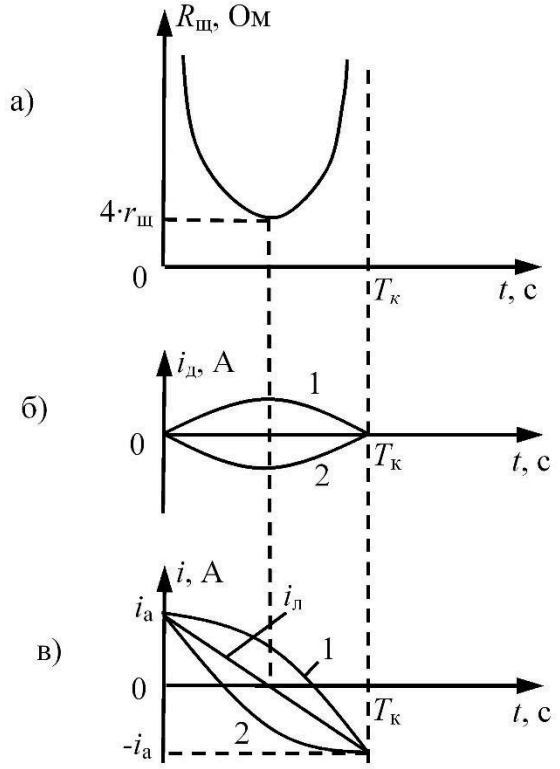

Рис. 5.17 – Пояснення небезпеки процесу комутації

На рис. 5.17 приведено залежності: $R_{щ} = f(t)$ – рис. 5.17,а; $i_{д} = f(t)$ – рис. 5.17,б та $i = f(t)$ – рис. 5.17,в. Крива 1 ілюструє процес комутації при $e_с + e_к > 0$, крива 2 – при $e_с + e_к < 0$ відповідно.

Крива $i_п$ описує процес *лінійної комутації*, при якій іскріння є найменшим.

Крива 1 описує процес *сповільненої комутації*, при якій швидкість зміни струму наприкінці періоду комутації більше, ніж при лінійній комутації. Це приводить до появи більшої ЕРС самоіндукції та посиленого іскріння під боком щітки, що сходить із пластини колектора.

Крива 2 описує процес *прискореної комутації*, при якій швидкість зміни струму на початку періоду комутації більше, ніж при лінійній комутації. Це приводить до появи більшої ЕРС самоіндукції та посиленого іскріння під боком щітки, що набігає на пластини колектора.

Ймовірність іскріння збільшується зі збільшенням швидкості обертання валу колектору.

Зменшення іскріння при комутації досягається установкою додаткових полюсів на геометричній нейтралі машини змінного струму.

Крім розглянутої вище електромагнітної комутації, в машинах постійного струму має місце механічна комутація, зумовлена механічними причинами (нерівність колектора, щіток, слабкий тиск пружин щіткового вузла тощо). Зменшення іскріння механічного характеру досягається механічною обробкою колектора та щіткового вузла.

Способи збудження електричних машин постійного струму. *Збудження* машини постійного струму – це спосіб створення основного магнітного потоку.

Для пояснення способів збудження електричних машин постійного струму будемо застосовувати стандартні умовні позначення електричних машин постійного струму на електричних схемах, подані на рис. 5.18.

За способом збудження машини постійного струму бувають двох типів: з незалежним збудженням та із самозбудженням.

Електрична машина постійного струму з незалежним збудженням – машина, обмотка збудження якої живиться від сторонніх джерел постійного струму (рис. 5.19,а).

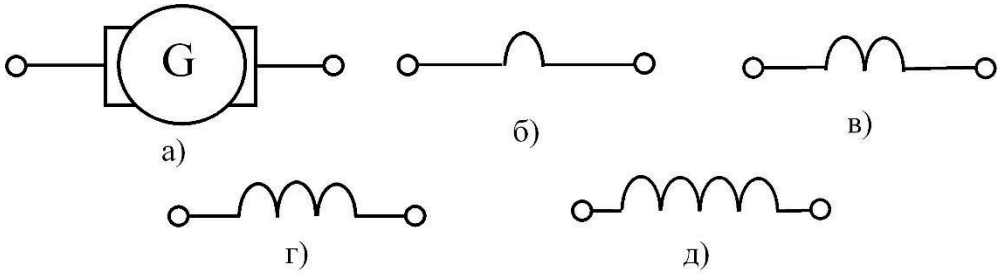

Рис. 5.18 – Умовні позначення на електричних схемах електричних машин постійного струму, подані на прикладі генератора: а – обмотка якоря, б – обмотка додаткових полюсів, в – компенсуюча обмотка, г – обмотка послідовного збудження, д – обмотка паралельного або незалежного збудження

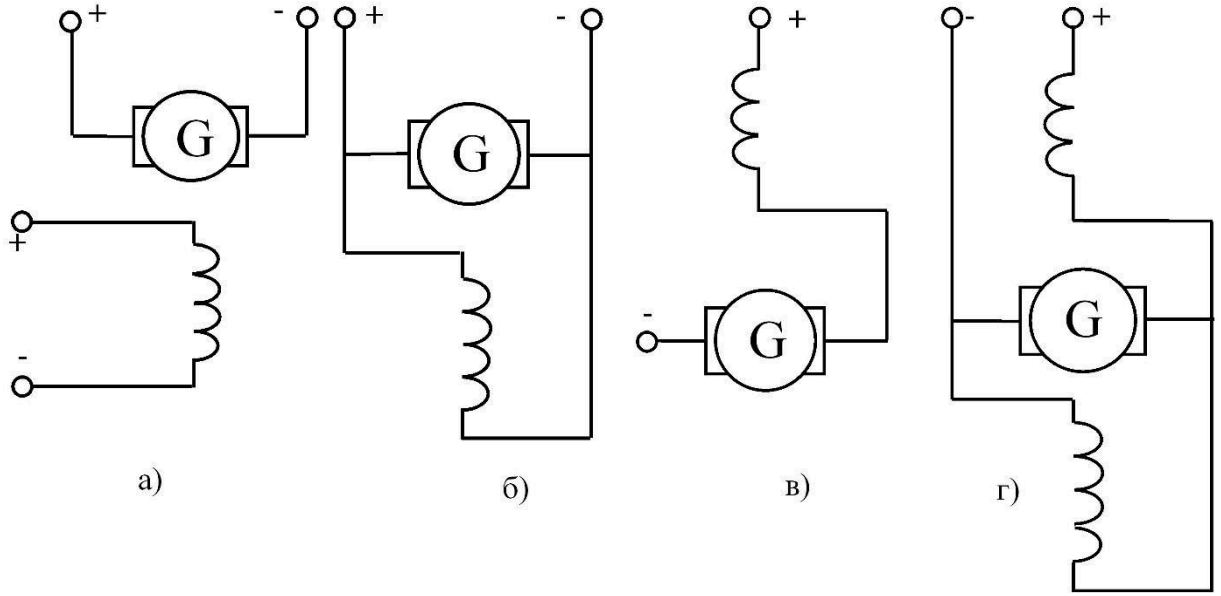

Рис. 5.19 – Способи збудження електричних машин постійного струму на прикладі генератора: а – незалежне, б – паралельне, в – послідовне, г – змішане

Електрична машина постійного струму із самозбудженням – машина, обмотка збудження якої живиться від власних якорів. Існує три способи самозбудження: паралельне (шунтове), послідовне (серієсне) та змішане (компаундне).

Електрична машина постійного струму з паралельним збудженням – машина, обмотка збудження якої вмикається паралельно до обмотки якоря (рис. 5.19,б).

Електрична машина постійного струму з послідовним збудженням – машина, обмотка збудження якої вмикається послідовно до обмотки якоря (рис. 5.19,в).

Електрична машина постійного струму зі змішаним збудженням – машина, обмотка збудження якої має дві котушки (обмотки), одна з яких вмикається послідовно (серієсна обмотка), а друга – паралельно (шунтова обмотка) до обмотки якоря (рис. 5.19.г).

Також є електричні машини постійного струму, збудження яких здійснюється постійними магнітами.

Генератори постійного струму. Генератори постійного струму мають ряд характеристик, основними з яких є наступні:

1. *Характеристика холостого ходу* – залежність напруги на затискачах генератора від сили струму збудження за відсутності навантаження та постійної швидкості обертання вала якоря: $U_0 = f(I_з)$ при $I_н = 0$ та $n = \text{const}$.

2. *Характеристика під навантаженням* – залежність напруги на затискачах генератора від сили струму збудження за незмінних сили струму навантаження та швидкості обертання вала якоря: $U = f(I_з)$ при $I_н = \text{const}$ та $n = \text{const}$.

3. *Зовнішня характеристика* – залежність напруги на затискачах генератора від сили струму навантаження за постійної швидкості обертання вала за незмінної сили струму збудження (для генераторів із незалежним збудженням) або незмінного опору в колі збудження (для генераторів із самозбудженням): $U = f(I_н)$ при $n = \text{const}$ та $I_з = \text{const}$ (або $R_з = \text{const}$).

4. *Регулювальна характеристика* – залежність сили струму збудження від сили струму якоря за незмінного навантаження на затискачах та постійної швидкості обертання вала якоря: $I_з = f(I_я)$ при $U = \text{const}$ та $n = \text{const}$.

Генератори з незалежним збудженням застосовують у тих випадках, коли потрібне регулювання напруги в широких межах. Недоліком генератора з незалежним збудженням є необхідність наявності стороннього джерела збудження. На рис. 5.20 приведено зразковий вид характеристик генератора з незалежним збудженням.

Генератор з паралельним збудженням за характеристиками є подібним генератору з незалежним збудженням. Характеристика холостого ходу, характеристика під навантаженням та регулювальна характеристика генератора з паралельним збудженням є подібними відповідним характеристикам генератора з незалежним збудженням. Зовнішня характеристика генератора з паралельним збудженням (рис. 5.21) різко відрізняється від відповідної характеристики генератора з незалежним збудженням.

Сила струму обмотки збудження становить лише 1÷3 % сили струму якоря. Генератор може бути навантажений тільки до визначеного значення критичної сили струму $I_{\text{ямах}}$, після чого сила струму зменшується разом зі зменшенням напруги.

За плавного зменшення опору в колі навантаження сила струму генератора збільшується. При плавному досягненні короткого замикання в колі навантаження по якорю тече струм короткого замикання $I_{\text{якз}}$, обумовлений лише потоком залишкового магнетизму, що не становить пожежної небезпеки.

При раптовому короткому замиканні (тобто швидкій зміні струмів у колі навантаження) магнітний потік не встигає швидко зменшитися. Тому величина струму раптового короткого замикання є великою, і на колекторі виникає круговий вогонь.

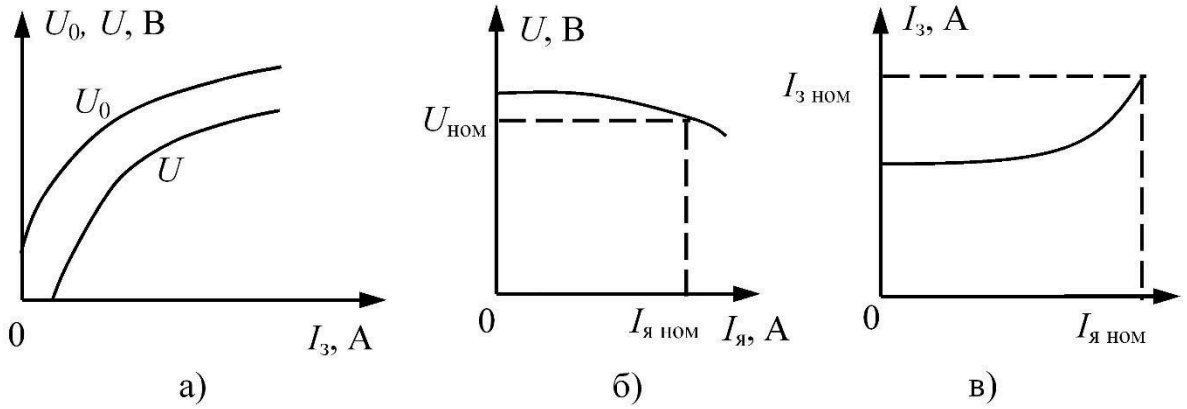

Рис. 5.20 – Зразковий вид характеристик генератора з незалежним збудженням: а – холостого ходу та під навантаженням, б – зовнішня, в – регулювальна

Перевагою генератора з паралельним збудженням є те, що для його роботи не потрібне джерело струму збудження, на виході достатньо стійка напруга.

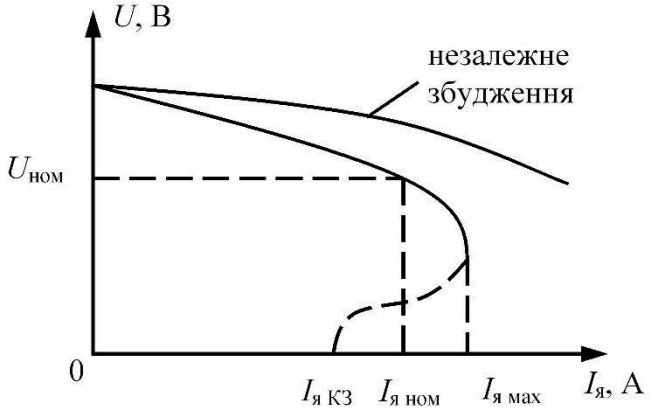

Рис. 5.21 – Зразковий вид зовнішньої характеристики генератора з паралельним збудженням

Генератор з послідовним збудженням. В такому генераторі сила струму збудження завжди дорівнює силі струму навантаження. Напруга генератора різко залежить від навантаження, тому такі генератори застосовуються достатньо рідко – тільки при роботі з постійним навантаженням. Для генератора з послідовним збудженням можна зняти лише зовнішню характеристику (рис. 5.22). Для зняття інших характеристик необхідно обмотку збудження живити від незалежного джерела.

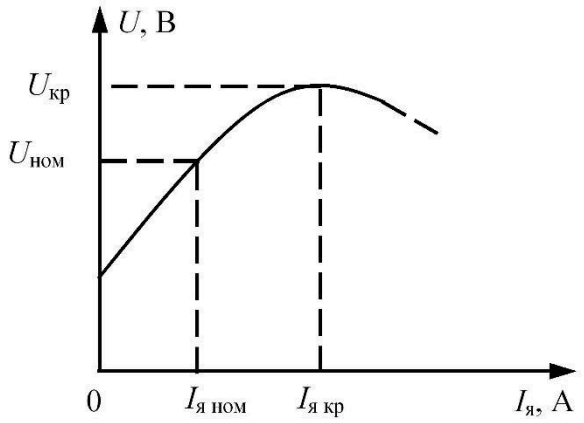

Рис. 5.22 – Зразковий вид зовнішньої характеристики генератора з послідовним збудженням

Генератор зі змішаним збудженням. Генератор має дві обмотки збудження – паралельну (шунтову) і послідовну (серієсну). Якщо обмотки включаються узгоджено, то намагнічувальні сили складаються. Паралельна обмотка збуджує машину при холостому ході і номінальній напрузі.

Характеристика холостого ходу та характеристика під навантаженням генератора зі змішаним збудженням є подібними відповідним характеристикам генератора з паралельним збудженням.

Зразковий вид зовнішньої та регулювальної характеристик генератора зі змішаним збудженням подано на рис. 5.23.

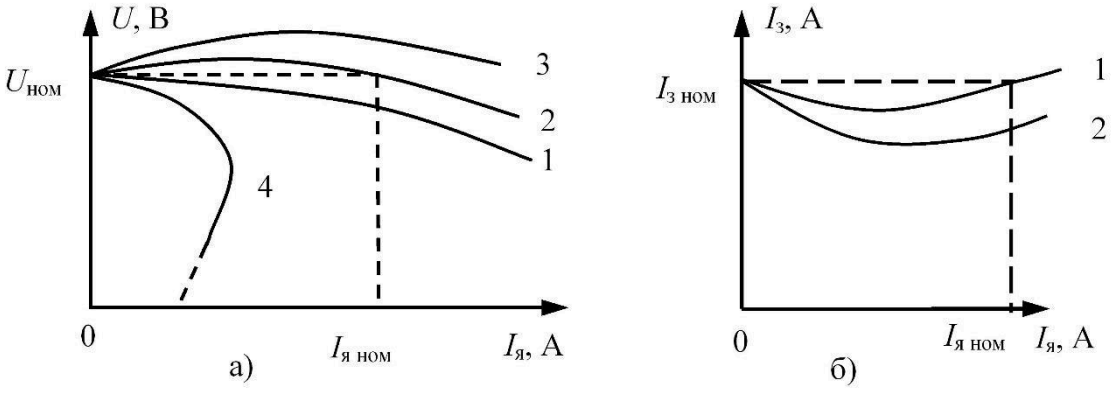

Рис. 5.23 – Зразковий вид характеристик генератора зі змішаним збудженням: а – зовнішня, б – регулювальна

На рис. 5.23,а крива 1 – зовнішня характеристика генератора з паралельним збудженням (приведено для порівняння), крива 2 – зовнішня характеристика генератора зі змішаним збудженням при звичайній

послідовній обмотці, крива 3 – зовнішня характеристика генератора зі змішаним збудженням при посиленій послідовній обмотці (застосовується для досягнення постійного значення напруги за змін навантаження), крива 4 – зовнішня характеристика генератора зі змішаним збудженням при супротивно включеній послідовній обмотці (застосовується для досягнення постійного струму при коливаннях напруги на навантаженні, наприклад у зварювальних установках на постійному струмі).

На рис. 5.23,б крива 1 – регулювальна характеристика генератора зі змішаним збудженням при звичайній послідовній обмотці, крива 2 – регулювальна характеристика генератора зі змішаним збудженням при посиленій послідовній обмотці.

Генератори постійного струму зі змішаним збудженням на практиці застосовуються найбільш часто.

Двигуни постійного струму. Основна перевага двигунів постійного струму, що й зумовлює галузь їх використання, – можливість регулювати в широких межах оберти вала електричним шляхом.

Пуск двигуна постійного струму в хід. У момент пуску двигуна частота обертання якоря дорівнює нулю, тому $E = 0$.

Тоді з основного рівняння двигуна (5.34) випливає: $U = I \cdot R_я$. Звідкіля:

$$I_я = \frac{U}{R_я}. \qquad (5.52)$$

Оскільки опір якоря $R_я$ малий, то при пуску двигуна виникає великий пусковий струм, що не припустимо. Тому для пуску електричних двигунів постійного струму застосовують спеціальні способи:

1) *Пряме включення.* Застосовують лише для двигунів малої потужності (потужністю не більше 1÷2 кВт). При цьому в момент пуску виникає кидок струму й удар по деталях привода.

2) *Введення реостата* з опором $R_п$ *в коло якоря* для обмеження пускового струму. У цьому випадку сила пускового струму визначається за формулою:

$$I_я = \frac{U}{R_я + R_п}. \qquad (5.53)$$

Величину опору $R_п$ пускового реостата вибирають такою, щоб сила пускового струму двигуна не перевищувала подвійного значення номінальної сили струму:

$$R_п = \frac{U}{2 \cdot I_{яном}} - R_я, \qquad (5.54)$$

$I_{\text{ном}} = \dfrac{U - E}{R_{\text{я}}}$ де – номінальна сила струму, що споживається двигуном.

3) *Пуск за зниженої напруги* джерела живлення.

Двигуни постійного струму мають ряд характеристик, основними з яких є наступні:

1. *Механічна характеристика* двигуна постійного струму – залежність швидкості обертання n вала якоря від корисного моменту навантаження M на валу за постійних напруги U та опору кола збудження $R_з$: $n = f(M)$ при U = const та $R_з$ = const.

2. *Робочі характеристики* двигуна постійного струму – залежності швидкості n обертання вала, електромагнітного моменту $M_е$, сили струму якоря $I_я$ та коефіцієнта корисної дії η від корисної потужності на валу P_2 за незмінних напруги U та опору кола збудження $R_з$: $n = f(P_2)$, $M_е = f(P_2)$, $I_я = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$ при U = const та $R_з$ = const.

3. *Характеристика холостого ходу* – залежність швидкості n обертання вала від сили струму збудження $I_з$: $n = f(I_з)$.

4. *Регулювальна характеристика* – залежність сили струму збудження $I_з$ від сили струму якоря $I_я$: $I_з = f(I_я)$.

Механічні характеристики двигунів з незалежним та паралельним збудженням є однаковими. В основне рівняння двигуна (5.34) підставляємо формули (5.45) та (5.49) та отримуємо рівняння механічної характеристики для двигунів з незалежним та паралельним збудженням:

$$n = \frac{U}{C_е \cdot \Phi_0} - \frac{M \cdot R_я}{C_е \cdot C_м \cdot \Phi_0^2}. \qquad (5.55)$$

Аналіз формули (5.55) дозволяє зробити висновок, що двигуни мають стійкі оберти холостого ходу $n_0 = \dfrac{U}{C_е \cdot \Phi_0}$, залежність $n = f(M)$ є лінійною, а швидкість обертів якоря мало залежить від моменту (механічна характеристика є *жорсткою*).

Механічна характеристика двигуна з послідовним збудженням. При послідовному збудженні сила струму збудження дорівнює силі струму якоря та силі струму навантаження. Із закону Ома для магнітного кола (2.24) випливає, що магнітний потік Φ_0 є прямо пропорційним силі струму якоря $I_я$:

$$\Phi_0 = \frac{F_я}{R_м} = \frac{I_я \cdot w}{R_м} = K \cdot I_я, \qquad (5.56)$$

де K – коефіцієнт пропорційності.

Формулу (5.56) підставляємо у формулу (5.49) та отримуємо:

$$M = C_м \cdot \Phi_0 \cdot I_я = \frac{C_м}{K} \cdot \Phi_0^2 \quad . \tag{5.57}$$

Формулу (5.57) підставляємо у формулу (5.55) та отримуємо рівняння механічної характеристики для двигунів із послідовним збудженням:

$$n = \frac{U}{C_е \cdot \sqrt{\frac{K}{C_м} \cdot M}} - \frac{R_я}{C_е \cdot K} \quad . \tag{5.58}$$

Аналіз формули (5.58) дозволяє зробити висновок, що швидкість обертів якоря двигуна з послідовним збудженням у значній мірі залежить від моменту (механічна характеристика є *м'якою)*. За малого навантаження швидкість обертів нескінченно зростає. Тому відсутність навантаження призведе до "розносу" (аварії) двигуна.

Механічна характеристика двигуна зі змішаним збудженням є проміжною між характеристиками двигуна з паралельним та послідовним збудженням.

На рис. 5.24 подано зразковий вид механічних характеристик для двигунів постійного струму з незалежним або паралельним збудженням (крива 1), послідовним збудженням (крива 2) та змішаним збудженням (крива 3).

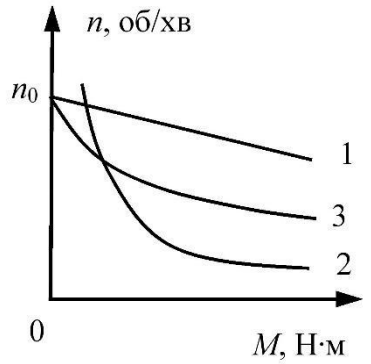

Рис. 5.24 – Зразковий вид механічних характеристик для двигунів постійного струму з незалежним або паралельним збудженням (крива 1), послідовним збудженням (крива 2) та змішаним збудженням (крива 3)

На рис. 5.25 приведено зразковий вид робочих характеристик для двигунів постійного струму з паралельним (рис. 5.25,а) та послідовним (рис. 5.25,б) збудженням. Робочі характеристики двигуна зі змішаним збудженням є проміжними між робочими характеристиками двигуна з паралельним та послідовним збудженням.

Слід відмітити, що електромагнітний момент M_e, корисний (обертальний) момент на валу M та момент втрат холостого ходу M_0 пов'язані між собою наступною формулою:

$$M = M_e - M_0 \quad (5.59)$$

Як правило, $M_0 = 0$, та вважають $M_e \approx M$

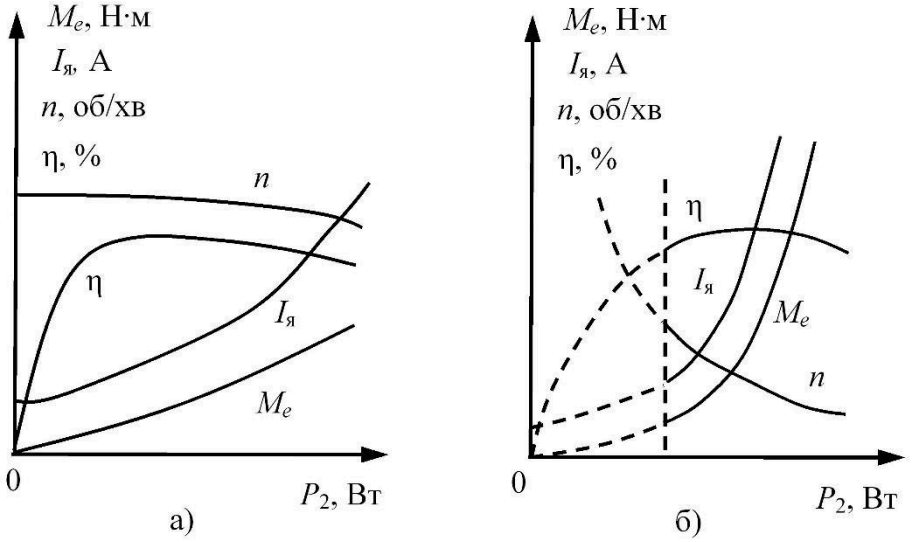

Рис. 5.25 – Зразковий вид робочих характеристик для двигунів постійного струму: а – з паралельним збудженням, б – з послідовним збудженням

Регулювання швидкості обертання вала якоря двигуна постійного струму. В основне рівняння двигуна (5.34) підставляємо формулу (5.45) та отримуємо рівняння:

$$n = \frac{U - I_я \cdot R_я}{C_e \cdot \Phi_0} \quad (5.60)$$

Аналіз формули (5.60) дозволяє зробити висновок, що швидкість обертання вала двигуна можна регулювати трьома способами:

1. *Зміною напруги на затискачах якоря*. Цей спосіб, як правило, застосовується у двигунах з незалежним збудженням. Залежність кількості обертів вала n від напруги U є лінійною. Діапазон регулювання є достатньо широким (до 1:10). Для двигунів великої потужності застосовується система "

2. винів з

3. вала.

Реверсування електричного двигуна постійного струму. Реверсуванням називається зміна напрямку обертання вала двигуна.

Аналіз формули (5.49) дозволяє зробити висновок, що реверсування досягається двома способами:

– зміною напрямку струму в якорі за незмінної полярності полюсів;

– зміною напрямку струму збудження за незмінного напрямку струму в якорі.

Гальмування вала якоря двигуна постійного струму. Гальмування може здійснюватися механічно (за допомогою механічних гальм) та електрично.

Електричне гальмування може бути *динамічним* та *рекуперативним* (з поверненням електричної енергії в мережу).

Динамічне гальмування здійснюється шляхом переводу електричного двигуна в генераторний режим. При цьому вал машини обертається у напрямку, що є протилежним напрямку електромагнітного моменту. Динамічне гальмування електричного двигуна постійного струму можливе до реверсування.

Для рекуперативного гальмування необхідно, щоб проти-ЕРС стала більшою, ніж напруга на затискачах. При цьому струм у якорі міняє свій напрямок, машина працює у генераторному режимі та розвиває гальмуючий момент.

На рис. 5.26 подано зовнішній вигляд електричного двигуна постійного струму марки ДПЭ 54-1, призначеного для привода робочих механізмів екскаваторів.



Рис. 5.26 – Зовнішній вигляд електричного двигуна постійного струму марки ДПЭ 54-1

Галузь застосування електричних двигунів постійного струму. Враховуючи усі переваги та недоліки електричних двигунів постійного струму з різними способами збудження, двигуни з паралельним збудженням використовують у механізмах, що потребують постійної швидкості обертів вала (у верстатах, вентиляторах тощо); двигуни з послідовним збудженням використовують як тягові двигуни електровозів, трамваїв тощо; двигуни зі змішаним збудженням використовують у механізмах із маховиками (часто це двигуни тролейбусів).

Пожежна небезпека електричних машин постійного струму. З точки зору пожежної небезпеки, найбільш небезпечною частиною електричних машин постійного струму є колектор зі щітковим вузлом. Колектор, внаслідок електромагнітної та механічної комутації, навіть за нормальної роботи електричної машини є джерелом іскріння. При експлуатації при погіршенні електричного контакту між щітками та колектором збільшується перехідний опір у місці контакту. Внаслідок цього збільшується й тепловиділення. За несприятливих умов може виникнути навіть так званий "*ефект вогненного кільця*".

Електричний двигун підлягає періодичному технічному обслуговуванню, що включає змащування підшипникових вузлів, замір опору ізоляції обмоток, визначення ступеня зносу щіток та їх заміну у разі необхідності, підтягування болтових з’єднань.