

## Лекція №3

# ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ МОМЕНТ ТА МАГНІТНЕ ПОЛЕ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

### План лекції:

1. ЕРС обмотки якоря машини постійного струму.
2. Електромагнітний момент та електромагнітна потужність.
3. Магнітне коло машини постійного струму.
4. Реакція якоря машини постійного струму.
5. Вплив реакції якоря на роботу машини постійного струму.
6. Способи збудження машин постійного струму.

### 1 ЕРС обмотки якоря машини постійного струму

При обертанні обмотки якоря в магнітному полі машини з частотою обертання  $\omega$  в кожному її провіднику створюється ЕРС  $E_{np}$ :

$$E_{np} = B_{cp} \cdot l \cdot v, \quad (3.1)$$

де  $B_{cp}$  – середнє значення магнітної індукції в машині, *Тл*;  
 $l$  – довжина провідника в пазу (приблизно рівна довжині якоря), *м*;  
 $v$  – лінійна (колова) швидкість руху провідника в магнітному полі, *м/с*.

$$v = \omega \cdot D_a / 2, \quad (3.2)$$

де  $\omega$  – кутова частота обертання, *рад/с*.

Середнє значення індукції пропорційне загальному потоку, що пронизує циліндр якоря і обернено пропорційне його площі

$$B_{cp} = 2p \cdot \Phi / \pi \cdot D_a \cdot l, \quad (3.3)$$

де  $\Phi$  – магнітний потік одного полюса, *Вб*;  
 $D_a$  – діаметр якоря, *м*;  
 $2p$  – число основних полюсів машини, *шт.*;  
 $p$  – число пар полюсів машини, *шт.*

З урахуванням (3.1), (3.2) та (3.3), ЕРС провідника  $E_{np}$  можна представити, як

$$E_{np} = p \cdot \Phi \cdot \omega / \pi. \quad (3.4)$$

ЕРС обмотки – це та ЕРС, що створюється в одній паралельній вітці  $N/2a$  провідниками, отже,

$$E_a = E_{np} \cdot N / 2a. \quad (3.5)$$

де  $N$  – число активних провідників обмотки, шт.;  
 $2a$  – число паралельних віток обмотки, шт.;  
 $a$  – число пар паралельних віток обмотки, шт..

Таким чином з урахуванням (3.4)

$$E_a = p \cdot N \cdot \Phi \cdot \omega / 2\pi \cdot a, \quad (3.6)$$

де  $p \cdot N / 2\pi \cdot a = k$  – *електромашинна стала*.

Враховуючи, що  $\omega = 2\pi n / 60 = \pi n / 30$ , тоді вираз (3.6) можна також записати у вигляді

$$E_a = p \cdot N \cdot \Phi \cdot n / 60 \cdot a, \quad (3.6')$$

де  $p \cdot N / 60 \cdot a = k$  – *електромашинна стала*.

Отже, остаточна формула ЕРС якоря

$$E_a = k \cdot \Phi \cdot \omega, \quad (3.7)$$

або

$$E_a = k \cdot \Phi \cdot n. \quad (3.7')$$

Слід зазначити, що максимальне значення  $E_a$  (3.5) буде мати лише в тому випадку, коли щітки розташовані на поперечній осі машини, яку називають геометричною нейтраллю. При зміщенні щіток з поперечної осі на кут  $\beta$ , значення ЕРС буде зменшуватись

$$E_a = k \cdot \Phi \cdot \omega \cdot \cos \beta. \quad (3.8)$$

ЕРС якоря  $E_a$ , що виникає при роботі машини постійного струму в режимі генератора, створює напругу на його затискачах, а при ввімкненні навантаження, викликає струм. При використанні машини в якості двигуна, ЕРС направлена назустріч струму, обмежуючи його величину.

## 2 Електромагнітний момент та електромагнітна потужність

**Електромагнітний момент.** При протіканні струму по провідниках якоря, що розташовані в магнітному полі, на кожен з них відповідно з ((1.2), лекція 1) діє електромагнітна сила (сила Ампера)  $F_{em}$ .

$$F_{em} = B_{cp} \cdot l \cdot i_a, \quad (3.9)$$

де  $i_a$  – струм, що протікає в активному провіднику секції якоря,  $A$ .

$$i_a = I_a / 2a \quad I_a = 2a \cdot i_a, \quad (3.10)$$

де  $I_a$  – струм якоря,  $A$ .

Враховуючи, що провідники обмотки якоря рівномірно розміщені по циліндру в пазах якоря, сили, які діють на кожен із них, створюють результуючий електромагнітний момент

$$M_{em} = F_{em} \cdot N \cdot D_a / 2. \quad (3.11)$$

З урахуванням (3.3), (3.9) та (3.11)

$$M_{em} = p \cdot N \cdot \Phi \cdot I_a / 2\pi \cdot a, \quad (3.12)$$

тобто, враховуючи електромашинну сталу  $k$ , отримаємо

$$M_{em} = k \cdot \Phi \cdot I_a. \quad (3.13)$$

Електромагнітний момент  $M_{em}$  (3.13), що виникає при роботі машини в режимі двигуна, створює обертовий момент, під дією якого приводиться до обертання механічне навантаження на його валу. При використанні машини в якості генератора, електромагнітний момент є гальмівним, який протидіє моменту приводного двигуна.

Електромагнітна потужність. Ця потужність машини пропорційна електромагнітному моменту та кутовій частоті обертання, тобто може бути виражена механічними величинами

$$P_{em} = M_{em} \cdot \omega. \quad (3.14)$$

Враховуючи (3.13), потужність можна виразити і через електричні та магнітні величини

$$P_{em} = k \cdot \Phi \cdot I_a \cdot \omega, \quad (3.15)$$

або з урахуванням (3.7) лише через електричні

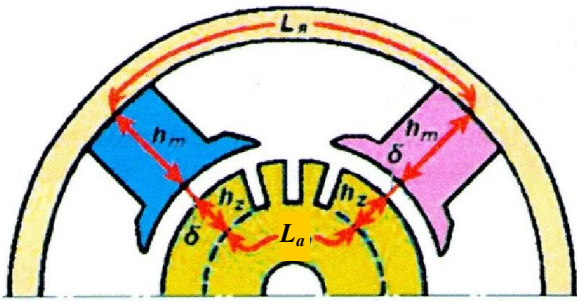
$$P_{em} = E_a \cdot I_a. \quad (3.16)$$

Вирази (3.14) та (3.16) можна прокоментувати таким чином, електромагнітна потужність це проміжна ланка через яку відбувається взаємне перетворювання електричної і механічної потужності: дійсно, у двигуні підведена електрична потужність  $P_e$  спершу перетворюється в електромагнітну, а з неї в механічну  $P_m$ . В генераторі підведена механічна потужність через електромагнітну, яка є добутком ЕРС та струму якоря, перетворюється в електричну.

### 3 Магнітне коло машини постійного струму

Однією із умов роботи електричної машини є наявність магнітного поля, яке звичайно має кілька складових. Основне поле (основний потік) в машині постійного струму створюється індуктором, розміщеним на статорі. По обмотці ротора (якоря), при роботі під навантаженням, протікає струм якоря, який також створює своє магнітне поле – поле якоря.

Будь-яка електрична машина має два кола: електричне та магнітне, в машині постійного струму останнє складається із п'яти (в деяких машинах із шести) ділянок (рисунок 3.1):



**Рисунок 3.1** – Розрахункова ділянка чотириполюсної МПС

- головний полюс ( $h_m$ ), виконується з пластин легованої холоднокатаної конструкційної сталі товщиною (1 – 1,5) мм (в полюсних наконечниках головних полюсів машин середньої та великої потужності може розташовуватись компенсаційна обмотка, в цьому випадку додається шоста ділянка - зубцева зона полюса);
- повітряний проміжок (зазор) ( $\delta$ ), хоча і має мінімальну довжину, але опір потоку найбільший саме на цій ділянці (ділянка, де відсутнє насичення);
- зубцева зона якоря ( $h_z$ ) виділена окремою ділянкою, враховуючи незначний переріз (через наявність пазів) яким замикається магнітний потік (найбільш насичена ділянка магнітного кола);
- спинка якоря ( $L_a$ ), набрана з пластин електротехнічної сталі товщиною (0,35 – 0,5) мм (пластини для зниження втрат на вихрові струму ізолювані між собою спеціальним покриттям);
- яро ( $L_я$ ) – відрізається із товстостінної труби або відпивається із чавуну.

Проведення розрахунку магнітного кола машини, дає можливість визначити параметри обмотки збудження, магніторушійна сила (МРС) якої визначається за законом повного струму як сума МРС (магнітних напруг) на кожній ділянці кола

$$F_{o.з.} = 2F_{\delta} + 2F_z + 2F_m + F_a + F_y, \quad (3.17)$$

де  $F_{\delta}$ ,  $F_z$ ,  $F_m$ ,  $F_a$ ,  $F_y$  – магнітні напруги, відповідно, повітряного проміжку, зубцевої зони, головного полюса, спинки якоря та ярма відповідно (коефіцієнти 2 при МРС повітряного проміжку, зубцевої зони та головного полюса вказує на те, що таких ділянок у колі по дві).

Слід зазначити, що коли машина має компенсаційну обмотку, в (3.17) вносяться ще й дві МРС зубцевої зони додаткового полюса.

Розрахунок розпочинається з визначення магнітного потоку кола  $\Phi_n$  за відомими значеннями ЕРС обмотки якоря  $E_a$  частоти обертання  $\omega$  та електромашинної сталої  $k$  машини з (3.7):

$$\Phi_n = E_a / k \cdot \omega. \quad (3.18)$$

Враховуючи, що магнітний потік незмінний на всіх ділянках кола (за винятком потоку полюса, який вищий від значення  $\Phi_{ном}$  на величину потоку розсіяння, що враховується коефіцієнтом розсіяння ( $\sigma_m \approx 1,1 - 1,25$ ), визначається індукція кожної ділянки

$$B_i = \Phi / S_i, \quad (3.19)$$

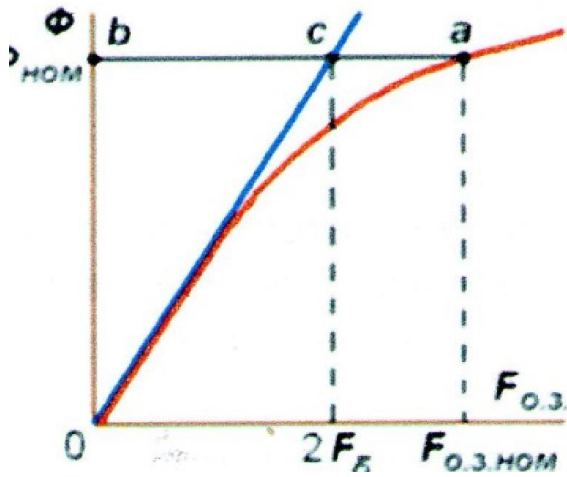
де  $B_i$  та  $S_i$ , – індукція та площа перерізу  $i$ -тої ділянки (геометричні розміри машини вважаються відомими).

За таблицями чи кривими намагнічування для феромагнітного матеріалу відповідної ділянки визначається напруженість поля  $H_i = f(B_i)$ , а потім магнітна напруга на  $i$ -тій ділянці  $F_i$

$$F_i = H_i \cdot l_i, \quad (3.20)$$

де  $l_i$  – довжина  $i$ -тої ділянки.

Задаючи кілька значень магнітного потоку (наприклад:  $0,5\Phi_n$ ,  $0,75\Phi_n$ ,  $\Phi_n$ ,  $1,25\Phi_n$ ), проводиться розрахунок кола для кожного значення потоку і будується магнітна характеристика машини (рисунок 3.2).



**Рисунок 3.2** – Магнітна характеристика кола МПС

Пряма  $0c$  характеризує прямолінійну зміну магнітного потоку в повітряному проміжку, а крива намагнічування  $0a$  – зміну потоку в машині до насичення магнітної системи. Відношення відрізків  $ab$  та  $bc$  називається коефіцієнтом насичення магнітного кола машини.

$$K_{\mu} = ab / bc = F_{o.з.ном} / 2F_{\delta} \quad (3.21)$$

де  $F_{o.з.ном}$  – номінальна магніто-рушійна сила, що створюється обмоткою збудження, А.

Для машин постійного струму звичайно  $K_{\mu} \approx 1,15 - 1,35$ . Якщо  $K_{\mu} < 1,15$ , то в машині буде перевитрата феромагнітного матеріалу (машина працює у ненасиченому режимі), якщо –  $K_{\mu} > 1,15$  перевитрата міді (магнітна система перенасичена). В обох випадках необхідно провести новий розрахунок, змінивши значення вихідної величини (3.18) в той, чи інший бік.

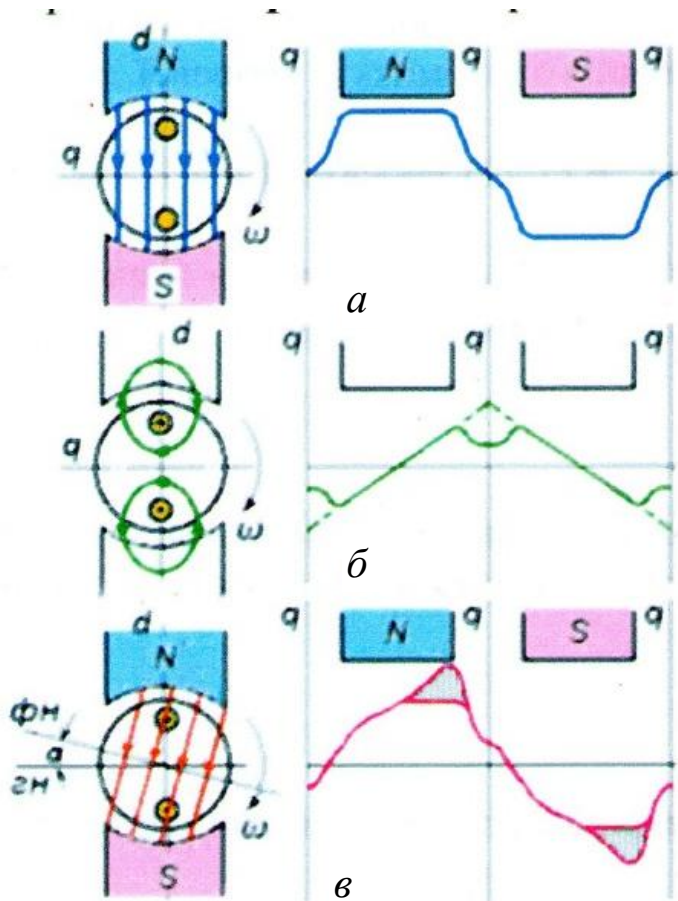
Після визначення МРС обмотки збудження, розраховується число витків  $w_3$  цієї обмотки за попередньо заданим значенням величини струму збудження  $I_3$ , в залежності від способу збудження машини.

$$w_3 = F_{o.з.} / I_3. \quad (3.22)$$

Розраховане за (3.22) значення числа витків округляється до цілого числа.

#### 4 Реакція якоря машини постійного струму

При роботі машини постійного струму в її магнітній системі обмоткою збудження створюється основний магнітний потік  $\Phi$ . Якщо машина працює в режимі неробочого ходу (н.х.), то цей потік буде направлений симетрично повздовжній осі машини ( $d$ ). На рисунку 3.3,  $a$  магнітний потік н.х., щоб не ускладнювати рисунок, зображено чотирма магнітними силовими лініями.



**Рисунок 3.3** – Магнітне поле та розподіл індукції при н.х (а), без збудження (б) і результуюче (в)

В результаті дії реакції якоря магнітне поле викривляється і стає несиметричним відносно поздовжньої осі  $d$ , (рисунок 3.3, в).

На рисунку 3.3 реакція якоря для випадку коли щітки розташовані на геометричній нейтралі машини пояснюється накладанням одного режиму на другий (так званим "методом суперпозиції"):

– рисунок 3.3, а зображує основне поле при відсутності струму в якорі (режим н.х.), а отже, і його поля;

– рисунок 3.3, б показує, визначене за правилом буравчика, магнітне поле, що створює виток (обмотка) якоря при відсутності струму збудження (полюси присутні лише як феромагнітний матеріал по осі  $d$ ). Напрямок струму витка такий, який створила б ЕРС, що наводиться в провідниках якоря (рисунок 3.3, а) в режимі генератора при обертанні ротора за годинниковою стрілкою. Розподіл індукції в повітряному проміжку (показаний пунктирною лінією) мав би місце тоді, коли б навколо циліндра якоря був циліндричної форми статор, як, наприклад, в машині змінного струму. Реально індукція розподіляється по

При роботі машини під навантаженням, струм протікаючи по обмотці якоря, створює своє поле – поле якоря, напрям якого визначається правилом буравчика. На рисунку 3.3, б це поле показано однією магнітною силовою лінією навколо провідника, що замінює в даному випадку всю обмотку якоря. Його напрям по осі  $q$  машини справа наліво, тобто справа струмом якоря створюється північний полюс  $N$ , а зліва –  $S$ .

Дія поля якоря на основний магнітний потік машини називається **реакцією якоря**.

кривій (зображеній жирною лінією), що має "провали" між полюсами, викликані відсутністю між ними феромагнітного матеріалу;

– рисунок 3.3, *в* – результуючі поле та розподіл індукції в повітряному проміжку, тобто накладання рисунка 3.3, *б* на рисунок 3.3, *а*. Зліва під полюсом  $N$  та справа під  $S$  поле ослабло (на одну силову лінію: назустріч двом лініям основного поля направлена одна лінія поля якоря) і, навпаки, справа під  $N$  і зліва під  $S$  підсилюється (на одну силову лінію: з двома лініям основного поля співпадає одна лінія поля якоря). Лінія, відносно до якої результуюче поле перпендикулярне, називається фізичною нейтраллю (ф.н.). Вона в режимі н.х. співпадає з геометричною нейтраллю (г.н.), а під дією реакції якоря зміщується з неї на кут  $\alpha$  за напрямом обертання.

Слід також зазначити, що рисунок 3.3 демонструє реакцію якоря при роботі машини в режимі генератора. Але ці ж рисунки будуть відображати реакцію якоря двигуна, якщо змінити напрям обертання (в даному випадку обертати проти годинникової стрілки) ротора.

## **5 Вплив реакції якоря на роботу машини постійного струму**

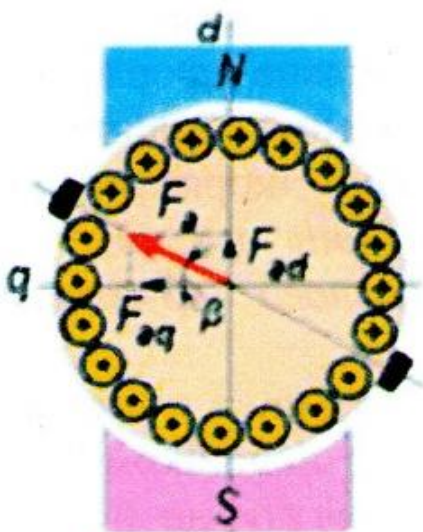
Зображені на рисунку 3.3, поле та індукція в повітряному проміжку машини постійного струму справедливі лише для машин з ненасиченою магнітною системою і без додаткових полюсів. В цьому випадку поле лише викривляється, а результатний потік не змінюється: на скільки зменшився потік під краєм полюса на який ротор набігає (в даному випадку на одну магнітну силову лінію) на стільки ж і збільшився під тим краєм полюса, з якого ротор збігає. Тобто, в ненасиченій машині постійного струму реакція якоря в підсумку не впливає на величину потоку, а тільки викривляє його.

Викривлення результуючого поля негативно впливає на робочі властивості машини. Перш за все, зміщення фізичної нейтралі відносно геометричної веде до більш важких умов роботи щіткового контакту і може стати причиною підвищення рівня іскріння між колектором та щітками. По-друге, викривлення результуючого поля призводить до перерозподілу магнітної індукції у повітряному проміжку, різко підвищуючи її під тими краями полюсів, з яких ротор збігає. Це, в свою чергу, веде до підвищення миттєвих значень ЕРС секцій обмотки якоря в моменти попадання пазових сторін цих секцій в зони мак-



симальних значень магнітної індукції. Як наслідок, зростає напруга між сусідніми колекторними пластинами, а при значному навантаженні таке зростання може перевищити допустимі межі, викликавши електричну дугу між пластинами. Графітовий пил, що утворюється внаслідок стирання щіток, буде сприяти розвитку електричної дуги, і може виникнути настільки потужна електрична дуга, що перекриє увесь колектор або його частину (в таких випадках вживається термін "круговий вогонь по колектору").

Такі наслідки реакції якоря при ненасиченій машині. Якщо машина насичена, реакція якоря буде вести до зниження результуючого магнітного поля, тому що один край полюса буде розмагнічуватись, а інший підмагнітитись, через насичення системи, не зможе. Це зниження індукції відповідає заштрихованим ділянкам на рисунку 3.3, в. Таким чином, в насиченій машині реакція якоря приводить не тільки до викривлення основного поля, а й до його зниження, що негативно позначається на роботі як генератора (знижується ЕРС), так і двигуна (зменшується електромагнітний момент).



**Рисунок 3.4** – Складові МРС обмотки якоря при зміщенні щіток з геометричної нейтралі

При зміщенні щіток з геометричної нейтралі, негативні наслідки реакції якоря підсилюються. Пояснюється це тим, що разом зі щітками на кут  $\beta$  в напрямку обертання зміщується і вектор МРС якоря (рисунок 3.4). При цьому МРС  $F_a$  отримує крім поперечної складової  $F_{aq}$  ще й поздовжню  $F_{ad}$ , найчастіше направлену назустріч основному магнітному потоку, суттєво ослабляючи його; якщо зміщувати щітки назустріч обертанню генератора (за обертанням у двигуна), то  $F_{ad}$  буде співпадати з основним полем, підсилюючи його, а це

може стати причиною іскріння на колекторі, тобто і те і інше лише погіршує роботу машини.

Розмагнічувальна дія реакції якоря вимагає збільшення числа витків обмотки збудження. Розрахувати таке збільшення досить складно, а тому при проектуванні машини в (3.22) вводиться так званий

коефіцієнт реакції якоря  $\kappa_{p.y.} \approx 1,05 - 1,22$ , межі якого отримані у результаті багаторічного досвіду проектування і експлуатації колекторних машин. Нижня межа  $\kappa_{p.y.}$  відповідає магнітній індукції зубцевої зони  $B_z = 1,7 \text{ Тл}$ , а верхня –  $B_z = 2,3 \text{ Тл}$ .

Щоб позбавитись від шкідливого впливу реакції якоря на машину, або хоч би знизити цей вплив до допустимих меж, при проектуванні застосовується один з двох наведених нижче засобів.

**Перший**, найбільш ефективний засіб зниження впливу реакції якоря по поперечній осі – застосування **компенсаційної обмотки**. Така обмотка розташовується в пазах полюсних наконечників, розподіляючись по їх поверхні, і вмикається послідовно з обмоткою якоря. Струм, що протікає в компенсаційній обмотці, створює МРС, яка направлена назустріч МРС реакції якоря і автоматично компенсує її при будь-яких навантаженнях, будучи рівною з нею по модулю. Таким чином, в машині з компенсаційною обмоткою при переході від НХ до режиму навантаження закон розподілу магнітної індукції у повітряному проміжку головних полюсів залишається практично незмінним. В просторі між полюсами частина МРС якоря все ж залишається не скомпенсованою. Її небажаний вплив на роботу щіткового контакту усувається застосуванням додаткових полюсів. Застосування компенсаційної обмотки збільшує вартість машини, тому вона виконується лише в машинах потужністю (150 – 500) кВт при напрузі більше 440 В.

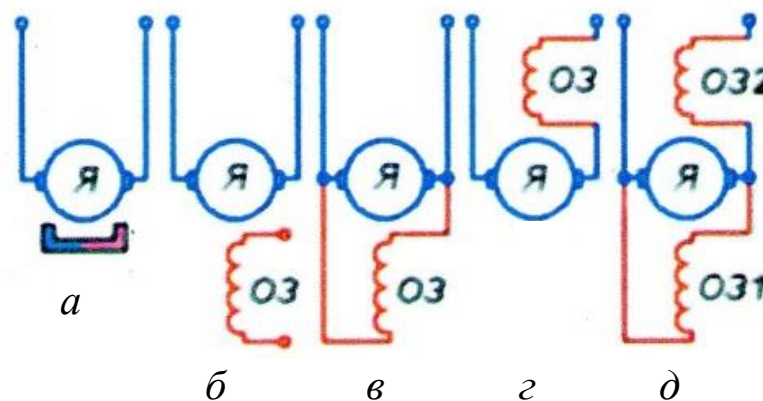
**Другий** – збільшення повітряного зазору між якорем та краями головних полюсів. Такий спосіб використовується у мікромашинах та машинах малої потужності. В цьому випадку машина буде насиченою лише по осі полюсів, де повітряний зазор мінімальний, а край кожного полюса ненасичений і допускає зростання потоку при реакції якоря. Цей спосіб значно знижує розмагнічувальну дію реакції якоря, але недоліком його є необхідність збільшувати намагнічувальну силу обмотки збудження.

На принципі зниження МРС поперечної реакції якоря за рахунок підвищеного магнітного опору на шляху її дії ґрунтується **інший спосіб ослаблення дії реакції якоря**. Його суть полягає в тому, що пластини головних полюсів виготовляються із листової анізотропної холоднокатаної сталі (наприклад 3411), штампуються вони так, щоб вісь полюса співпадала з напрямом прокатування сталі. В цьому

випадку магнітний потік на краях полюсів буде направлений поперек прокатування, а це буде створювати йому додатковий магнітний опір, унеможливаючи насичення країв полюсів.

## 6 Способи збудження машин постійного струму

Основне магнітне поле машини постійного струму може створюватись двома способами, а саме: **постійним магнітом** та **обмоткою збудження**. Збудження за допомогою постійних магнітів (рисунок 3.5, *a*) – магнітоелектричне збудження використовується для машин незначної потужності (до 30 кВт). До переваг такого збудження слід віднести відсутність втрат на збудження, а отже підвищення ККД машини, зниження її габаритів тощо, а до недоліку – неможливість змінювати величину основного магнітного потоку.



*a* – магнітоелектричне; *б* – незалежне; *в* – паралельне; *г* – послідовне; *д* – змішане

**Рисунок 3.5** – Способи збудження машин постійного струму

Найчастіше **магнітоелектричне** збудження використовується в двигунах. При цьому незмінність магнітного поля при регулюванні частоти обертання можна компенсувати зміною напруги в колі якоря.

Створення магнітного поля обмоткою збудження називається **електромагнітним** збудженням. Суттєва перевага такого збудження – можливість його використання в машині будь-якої потужності. В залежності від способу ввімкнення обмотки збудження **ОЗ** в коло обмотки якоря **Я**, машини постійного струму поділяються на машини незалежного збудження (рисунок 3.5, *б*) (до цих машин можна формально віднести і машини із магнітоелектричним збудженням) і машини, в яких обмотка збудження сполучена з обмоткою якоря: машини пара-

лельного збудження (рисунок 3.5, в), машини послідовного збудження (рисунок 3.5, з) та машини змішаного збудження (рисунок 3.5, д).

В машинах із незалежним збудженням обмотка збудження електрично не пов'язана з обмоткою якоря, а живиться від незалежного джерела постійного струму. Це, в деякій мірі, є недоліком такої машини, адже необхідно мати додаткове джерело енергії, потужність якого може сягати до 6 % від потужності машини.

Найбільш поширеними є машини, в яких обмотка збудження сполучена з обмоткою якоря. Струм обмоток збудження таких машин залежить від струму якоря і може сягати в паралельній якорю обмотці до 8 % в машинах малої потужності (до 10 кВт) і до 4 % (в машинах до 1000 кВт) від цього струму. В послідовній обмотці струм такий же, як і в обмотці якоря. При змішаному збудженні послідовна і паралельна обмотки в машинах малої потужності досить часто виконуються не рівнозначними: послідовна обмотка такої потужності, що її потік складає не більше 10 % від потоку паралельної обмотки. В цьому випадку вона лише компенсує розмагнічувальну дію реакції якоря, замінюючи тим самим компенсаційну обмотку, яка в таких машинах не виконується.

### **Контрольні запитання**

1. Вивести формулою за якою визначається ЕРС обмотки якоря.
2. За якою формулою визначається електромагнітний момент машини? (вивести її).
3. Яка роль електромагнітного моменту при роботі машини в різних режимах?
4. Як визначається електромагнітна потужність через механічні та електричні величини?
5. Чому електромагнітну потужність можна вважати проміжною ланкою між механічною та електричною потужностями?
6. З яких ділянок складається магнітне коло машини постійного струму?
7. Чи всі машини мають однакову кількість ділянок в магнітному колі?
8. Як визначається намагнічувальна сила обмотки збудження?

9. Як проводиться розрахунок магнітного кола машини?
10. Що таке магнітна характеристика машини?
11. Як визначається коефіцієнт намагнічування магнітного кола, в яких межах він має бути?
12. До яких наслідків веде завищення та заниження коефіцієнта намагнічування магнітного кола?
13. Що називається реакцією якоря?
14. Як направлений основний магнітний потік машини при НХ?
15. Яке поле створює струм, що протікає по обмотці якоря?
16. Як діє реакція якоря на основний потік при ненасиченій магнітній системі?
17. Як діє реакція якоря на основний магнітний потік при насиченій системі машини?
18. Як впливає на реакцію якоря зсув щіток з геометричної нейтралі?
19. Чому реакція якоря є шкідливою для роботи машини?
20. Як на практиці враховується розмагнічувальна дія реакції якоря при розрахунку числа витків обмотки збудження.
21. Перерахувати способи зниження негативного впливу дії реакції якоря на роботу машини?
22. Що дає використання компенсаційної обмотки?
23. Навіщо і коли збільшується повітряний проміжок між якорем та краями полюсів?
24. Чого можна досягти використовуючи для осердя головного полюса сталь марки 3411?
25. Як класифікуються машини постійного струму за способом збудження?
26. Перерахувати переваги та недоліки різних способів збудження.
27. Якої величини струм протікає по обмотках різних способів збудження у порівнянні зі струмом якоря?